

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



XXXIX

СИБИРСКИЙ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ
СЕМИНАР,

посвященный 90-летию
академика А. К. Реброва

28 – 31 августа 2023 г.
Новосибирск, Россия

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Сибирское отделение РАН

Отделение энергетики, машиностроения,
механики и процессов управления РАН

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Российский национальный комитет по теплообмену

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет



Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



XXXIX

СИБИРСКИЙ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ
СЕМИНАР,

посвященный 90-летию
академика А. К. Реброва

28 – 31 августа 2023 г.
Новосибирск, Россия

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Новосибирск 2023

Сборник содержит доклады Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых учёных "XXXIX Сибирский теплофизический семинар", посвящённой 90-летию академика А.К. Реброва, которая проводилась 28–31 августа 2023 года в Новосибирске. В сборнике представлены доклады по направлениям: процессы в разреженных газах и плазме, газофазный синтез наноструктур; конвективные течения и теплообмен в однофазных средах; методы управления турбулентностью и интенсификация теплопереноса; гидродинамика, теплообмен и волновые процессы в многофазных средах; теплообмен при фазовых переходах; процессы переноса при физико-химических превращениях, включая горение; теплофизические проблемы энергетики, энергоэффективность и энергосбережение; теплофизика микро- и наносистем; теплофизические свойства веществ и лучистый теплообмен; фундаментальные основы расчёта и принципов построения энергетических систем, основанных на эффекте сверхпроводимости.

Председатель

Маркович Д.М., академик РАН

Заместители председателя

Сиковский Д.Ф., к.ф.-м.н.

Морозов А.А., д.ф.-м.н.

Учёные секретари

Пинаев В.А., к.ф.-м.н.

Юдин И.Б.

Председатель Технического комитета

Тимошенко Н.И., к.ф.-м.н.

Зубова С.В., ООО "Научный сервис"

Организационный комитет

Батаев А.А., д.т.н.

Бердников В.С., д.ф.-м.н.

Бондарь Е.А., к.ф.-м.н.

Горчакова Н.Г., к.ф.-м.н.

Дулин В.М., д.ф.-м.н., проф. РАН

Елистратов С.Л., д.т.н.

Ерманюк Е.В., д.ф.-м.н.

Зарвин А.Е., к.ф.-м.н.

Зайковский А.В., к.ф.-м.н.

Зайцев Д.В., к.ф.-м.н.

Кабов О.А., чл.-корр. РАН

Кашинский О.Н., д.ф.-м.н.

Козлов В.В., д.ф.-м.н.

Кузнецов В.В., д.ф.-м.н.

Куйбин П.А., д.ф.-м.н.

Лукашов В.В., к.т.н.

Макаров М.С., к.ф.-м.н.

Марчук И.В., д.ф.-м.н., проф. РАН

Наумов И.В., д.т.н., проф. РАН

Низовцев М.И., д.т.н.

Новопашин С.А., д.ф.-м.н.

Павленко А.Н., чл.-корр. РАН

Пармон В.Н., академик РАН

Пахомов М.А., д.ф.-м.н., проф. РАН

Плотников М.Ю., к.ф.-м.н.

Прибатурин Н.А., чл.-корр. РАН

Смовж Д.В., д.ф.-м.н.

Станкус С.В., д.ф.-м.н.

Терехов В.В., д.ф.-м.н., проф. РАН

Терехов В.И., д.т.н.

Тулупов А.А., чл.-корр. РАН

Тупикин А.В., д.ф.-м.н.

Федорук М.П., академик РАН

Федяева О.Н., д.х.н., проф. РАН

Чеверда В.В., к.ф.-м.н.

Чекмарев С.Ф., д.ф.-м.н.

Чернов А.А., д.ф.-м.н., проф. РАН

Чиннов Е.А., д.ф.-м.н.

Шарыпов О.В., д.ф.-м.н.

Шторк С.И., д.ф.-м.н.

Яворский Н.И., д.ф.-м.н.

Ярыгин В.Н., д.т.н.

Программный комитет**Сопредседатели**

Алексеев С.В., академик РАН

Ребров А.К., академик РАН

Алифанов О.М., академик РАН

Аннин Б.Д., академик РАН

Аристов В.В., д.ф.-м.н.

Байдаков В.Г., д.ф.-м.н.

Большов Л.А., академик РАН

Булгаков А.В., д.ф.-м.н.

Булгакова Н.М., д.ф.-м.н.

Бурдуков А.П., д.т.н.

Вараксин А.Ю., чл.-корр. РАН

Васильев А.А., д.ф.-м.н.

Виноградов А.В., д.ф.-м.н.

Востриков А.А., д.ф.-м.н.

Гешев П.И., д.ф.-м.н.

Гогонин И.И., д.т.н.

Головин С.В., д.ф.-м.н., проф. РАН

Горышков Ю.Ф., академик АН РТ

Горячева И.Г., академик РАН

Губайдуллин Д.А., чл.-корр. РАН

Дедов А.В., чл.-корр. РАН

Драгунов Ю.Г., академик РАН

Дмитриев А.С., д.т.н.

Егоров И.В., член-корр. РАН

Запрягаев В.И., д.т.н.

Исаев С.А., д.ф.-м.н.

Кедринский В.К., д.ф.-м.н.

Клименко А.В., академик РАН

Кирдяшкин А.Г., д.т.н.

Ковалёв К.Л., д.т.н.

Коротеев А.А., академик РАН

Кривцов А.М., чл.-корр. РАН

Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н.

Кустова Е.В., д.ф.-м.н., проф. РАН

Левин В.А., академик РАН

Любимова Т.П., д.ф.-м.н.

Матвиенко В.П., академик РАН

Мессерле В.Е., д.т.н.

Мильман О.О., д.т.н.

Минаев С.С., д.ф.-м.н.

Михеев Н.И., д.т.н.

Морозов Н.Ф., академик РАН

Нагнибеда Е.А., д.ф.-м.н.

Нигматулин Р.И., академик РАН

Пенязков О.Г., академик НАНБ

Петреня Ю.К., чл.-корр. РАН

Петров О.Ф., академик РАН

Покусаев Б.Г., чл.-корр. РАН

Попов Г.А., академик РАН

Предтеченский М.Р., академик РАН

Пухначев В.В., чл.-корр. РАН

Рогалёв Н.Д., д.т.н.

Рудяк В.Я., д.ф.-м.н.

Сапожников С.З., д.т.н.

Сильников М.В., чл.-корр. РАН

Смирнов Е.М., д.ф.-м.н.

Стенников В.А., академик РАН

Суржилов С.Т., академик РАН

Сухинин Г.И., д.ф.-м.н.

Тестоедов Н.А., академик РАН

Фёдоров М.П., академик РАН

Филиппов С.П., академик РАН

Фомин В.М., академик РАН

Хомич В.Ю., академик РАН

Шарафутдинов Р.Г., д.ф.-м.н.

Шахов Е.М., д.ф.-м.н.

Шиплюк А.Н., чл.-корр. РАН

Шмотин Ю.Н., д.т.н.

Якуш С.Е., чл.-корр. РАН

Jiang P.-X., Prof.

Nanjalić K., Prof.

Lengrand J.C., Prof.

Li X., Prof.

Markides C.N., Prof.

Sazhin S.S., Prof.

Travnicek Z., Prof.

Wang Q., Prof.

Издание сборника докладов производилось с авторских листов участников конференции. За ошибки и опечатки авторов издательство ответственности не несёт.

СЕКЦИЯ 1

Процессы в разреженных газах и плазме, газофазный синтез наноструктур

УДК 621.793:533.9

ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ И ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аньшаков А.С.¹, Алиферов А.И.², Домаров П.В.^{1,2}, Фалеев В.А.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

В промышленном производстве порошковые материалы занимают значительное место. Низкотемпературная плазма расширила перечень технологий обработки с порошковыми материалами [1]. Как показывает практика, плазменная технология помогает создавать принципиально новые материалы, свойства которых могут более чем на порядок превосходить свойства известных и широко применяемых материалов.

Плазменное нанесение порошковых материалов на детали и изделия – распространенный электротехнологический процесс [2]. Технология весьма эффективна для напыления жаропрочных, коррозионно-стойких, износостойких, антифрикционных и многих других видов защитных покрытий. Источниками высокоскоростных и высокотемпературных струй для ввода напыляемого порошка служат малогабаритные электродуговые плазмотроны. Для эффективной реализации технологии применяются плазмотроны с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ), которыми оснащены отечественные установки для напыления.

В Институте теплофизики разработаны эффективные конструкции плазмотронов с МЭВ для нанесения металлических и керамических порошков [3]. В конструкциях плазмотронов типа ЭДП-167 предусмотрена подача основного (рабочего) и дополнительного (защитного) газа перед анодом. Рабочие газы – азот, аргон, азот-аргоновая смесь, воздух; защитные газы – воздух, аргон, пропан. Суммарный расход газа составлял 1,0 – 1,1 г/с. Раздельная подача газов и конфигурация сопла-анода являются эффективным методом снижения эрозии выходного электрода и высокой воспроизводимости параметров плазменной струи.

Сравнение безразмерных профилей динамического напора на срезе сопла плазмотрона ЭДП-167 и серийно выпускаемого с трубчатым электродом показало, что у плазмотрона с МЭВ плазменная струя симметричная и более компактная, чем у предшественника, где профиль зависит от места привязки дуги в аноде и имеет асимметричный вид.

Изготовление опытно-промышленной партии плоских низкотемпературных электронагревателей плазменным напылением порошков показало надежность и эффективность конструкции ЭДП-167. Применение МЭВ в конструкциях технологических плазмотронов для напыления ЭДП-167 [3], ПУН-3 [4] позволяет получить необходимую мощность устройства 10-50 кВт при меньших токах дугевого разряда, чем в плазмотронах с трубчатым выходным электродом.

Для синтеза нанопорошков карбида кремния разработан двухструйный плазмохимический реактор, в

котором значительная часть дугевого разряда (60-70%) находится вне зоны электродных узлов.

В этих условиях есть возможность подавать обрабатываемый порошок непосредственно в дугевого разряд, температура которого в зоне слияния анодной и катодной частей дуги составляет 6000-8000 К при токе дуги 100-150 А в аргоновой среде. Мощность двухструйного реактора при работе на аргоне составляла 12-23 кВт.

Температура реактора поддерживалась на уровне 1000-1600°C. Исходный порошок: диоксид кремния с размером зерен до 100 мкм и мелкозернистый углерод размером до 45 мкм. При расходе смеси SiO₂ +С равном 0,32 кг/ч и мощности плазмотрона 12,5 кВт в холодильнике собиралось 0,09 кг/ч продукта и еще часть в рукавном фильтре.

Трехструйные плазмохимические реакторы получили широкое распространение в лабораторных исследованиях и на производстве [5]. Они являются классическим примером многоструйных реакторных устройств с несколькими плазмотронами, которые устанавливаются на общую камеру смешения.

Многоструйные прямоточные реакторы выполняются с различным углом наклона плазмотронов к оси реактора – от 15 до 90°, что существенно изменяет гидродинамические и теплотехнические характеристики реакторов [4].

Таким образом, показано, что существует достаточно обширный перечень плазменных устройств во многих научных организациях и промышленных предприятиях, способных к обработке и получению дисперсных материалов различного назначения.

Список литературы:

1. Жуков М.Ф., Солоненко О.П., Высокотемпературные запыленные струи в процессах обработки порошковых материалов / Отв. ред. В.Е. Накоряков. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1990. 516 с.
2. Солоненко О.П., Алхимов А.П., Марусин В.В. и др. Высокоэнергетические процессы обработки материалов. Новосибирск: Наука, 2000. 425 с.
3. Аньшаков А.С., Алиферов А.И., Казанов А.М., Урбах Э.К. Электродуговой генератор плазмы для обработки порошковых материалов // Теплофизика и аэромеханика. 1998. Т. 5. № 2. С. 237-245.
4. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Новосибирск: Наука. 1999. 712 с.
5. Красовская Л.И., Моссэ А.Л. Плазмохимические процессы в трехструйных электродуговых реакторах. Минск: ИТМО НАН Б. 2000. 196 с.

УДК 533.5, 533.7

РАЗРЕЖЕННЫЙ РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ НЕДОРАСШИРЕННОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ**Быков Н.Ю.¹, Горбачёв Ю.Е.², Фёдоров С.А.^{2,1}**¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29² Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Интерес к детальному исследованию разреженных режимов взаимодействия струй малой плотности с окружающей средой связан с развитием аэрокосмических приложений и вакуумных технологий. Оценка параметров струй ракетных двигателей малой тяги, истекающих в разреженное затопленное пространство, необходима при проектировании космических летательных аппаратов (КЛА) с целью исключения вредного воздействия струи на поверхности КЛА [1]. Параметры истечения сильно недорасширенной струи определяют условия формирования кластеров в объеме газовой фазы, долю конденсата в струе, а в случае роста наноструктурной пленки непосредственно на напыляемой поверхности - скорость осаждения материала на подложку [2]. Недорасширенные струи являются предметом многих экспериментальных и теоретических исследований [3-7].

Настоящая работа преследует две цели. Во-первых, исследовать структуру и параметры недорасширенной струи в режиме течения близком к режиму рассеяния. Во-вторых, изучить возможное влияние процесса конденсации на параметры течения. Параметры газа в камере соответствуют переходному по числу Кнудсена и околоконтинуальному режимам истечения. Рассматривается диапазон значений числа Рейнольдса, характеризующего режим течения в слое смешения $1 < Re_L < 100$.

Исследование выполнено методом прямого статистического моделирования (ПСМ) [8]. Расчеты проведены с использованием параллельного алгоритма, основанного на декомпозиции расчетной области, и с привлечением технологии MPI на кластере Политехник-Торнадо.

Рассмотрены особенности изменения структуры и параметров течения при уменьшении числа Рейнольдса. Проанализирована возможность использования существующих эмпирических формул для оценки характерных размеров струи. Обсуждается возможность моделирования течения с использованием численных подходов на базе решения уравнений Навье-Стокса. Для исследования влияния конденсации на параметры течения в работе развивается кинетический подход, предложенный в [9,10]

В режимах разреженных течений, когда столкновения между газовыми молекулами достаточно редки, так что кластеры не успевают вырасти до больших размеров, их образование можно описывать в рамках квазихимической модели, когда рост/развал кластеров происходит за счет присоединения/отсоединения одного мономера [10]. Течение газа при этом может описываться как в рамках уравнений Навье-Стокса, так и в рамках метода прямого статистического моделирования (ПСМ).

Поскольку для малых кластеров подход, связанный с их описанием через поверхностное натяжение (жидко-капельная модель) [10] неприменим, возникает необходимость разработки альтернативных методов расчета скоростей реакций, описывающих эволюцию распределения кластеров по размерам. Рост кластеров описывается константой скорости, пропорциональной частоте упругих столкновений, а развал с использованием константы скорости роста и константы равновесия. Последняя может быть рассчитана через изменение энергии Гиббса [12]. Данные о параметрах констант скоростей реакций дают возможность использовать ТСЕ-модель (total collision energy model) для описания кластеризации в рамках метода ПСМ.

Для рассмотренного в работе диапазона параметров показано относительно слабое влияние процесса конденсации на структуру течения.

Список литературы:

1. Cai G., Liu L., He B., Ling G., Weng H., Wang W. A Review of Research on the Vacuum Plume// Aerospace. 2022. V. 9. 706.
2. Быков Н.Ю., Сафонов А.И., Лещев Д.В., Старинский С.В., Булгаков А.В. О газоструйном методе осаждения наноструктурных пленок серебра// ЖТФ. 2019. Т. 89. № 6. С. 830-843.
3. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения/ Новосибирск: Наука, 1984. 234 с.
4. Авдудевский В.С., Ашратов Э.А., Иванов А.В., Пирумов У.Г. Газодинамика сверхзвуковых неизобарических струй / М.: Машиностроение, 1989. 320 с.
5. Rebrov A.K. Free jets in vacuum technologies// J. Vac. Sci. & Technology. V. A19. 2001. P. 1679–1687.
6. Герасимов Ю. И., Ярыгин В. Н. Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия 2. Истечение в затопленное пространство// Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т.13. вып. 2.
7. Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Горбачев Ю.Е., Яскин А.С., Калыда В.В. Особенности процесса энергообмена в кластеризованном потоке аргона при инициации излучением электронным пучком// Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022 Т. 23. N 4.
8. Bird G.A. The DSMC Method. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2013. 300 p.
9. Bykov N., Gorbachev Yu. Mathematical models of water nucleation process for the direct simulation Monte Carlo method// Applied Mathematics and Computation. 2017. V. 296. P. 215-232.
10. Bykov N.Yu., Gorbachev Yu.E. Cluster formation in copper vapor jet expanding into vacuum: the direct simulation Monte Carlo// Vacuum, V.163. 2019 P. 119–127.
11. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. 1974. М. Машиностроение, 212 с.
12. Zhukhovitskii D.I. Size-corrected theory of homogeneous nucleation // 1994. V. 101, N 6, P. 5076-5080.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-11-00080. Вычислительные ресурсы предоставлены суперкомпьютерным центром Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

УДК 533.5,519.6

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПРЯМОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА ДЛЯ КЛАСТЕРОВ С ОБЩЕЙ ПАМЯТЬЮ

Быков Н. Ю.^{1,2}, Фёдоров С. А.^{1,2}

¹ Федеральное исследовательское учреждение "Информатика и управление" РАН, 119333, Россия, Москва, Вавилова, д.44, кор.2

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

Численное моделирование внутренних и внешних течений в переходном по числу Кнудсена режиме требует использования специальных методов расчета, основанных на решении уравнения Больцмана. Одним из наиболее распространенных численных методов является метод прямого статистического моделирования Монте-Карло (ПСМ) [1, 2]. К достоинствам метода относится возможность расчета геометрически сложных течений газовой смеси с физико-химическими процессами в объеме газовой фазы и на поверхности обтекаемых тел. К недостаткам метода относятся высокие требования, предъявляемые к вычислительным ресурсам при расчете пространственных течений, характеризующихся малыми числами Кнудсена.

Метод ПСМ является стохастическим и оперирует с "вычислительными" частицами. Макроскопические параметры течения получаются в результате осреднения параметров вычислительных частиц. Среднее число вычислительных частиц в расчетах на современном этапе развития метода составляет более 10^9 . Проведение эффективных, с точки зрения затрачиваемого компьютерного времени и оперативной памяти, расчетов требует развития параллельных алгоритмов, оптимально использующих архитектуру современных кластеров с общей памятью.

Разработка высокопроизводительных алгоритмов для метода ПСМ началась с середины 90х и была обусловлена интенсивным развитием многопроцессорных ЭВМ. Наиболее популярным методом параллелизации являлся метод декомпозиции расчетной области [3, 4], однако были предложены и альтернативные подходы, связанные с декомпозицией по данным [5] и декомпозицией по статистически независимым ветвям нестационарной задачи [6]. В настоящее время получили распространение многоуровневые подходы, использование которых особо актуально для гетерогенных кластеров с большим числом CPU/GPU на одном узле [7].

Настоящая работа посвящена разработке одноуровневых алгоритмов метода ПСМ для расчета течений разреженного газа. Развитие одноуровневых алгоритмов важно для ускорения вычислений как на вычислительных системах с многоядерными архитектурами, так и на кластерах с общей памятью и гетерогенных архитектурах. Особое внимание уделяется алгоритму параллелизации по данным и использованию технологии OpenMP.

Разработка и реализация параллельного алгоритма в случае стохастического метода ПСМ требует, в первую очередь, корректной реализации генератора псевдослучайных чисел для каждого потока без необходимости синхронизации. Во-вторых, наличие различных по

функционалу основных блоков алгоритма требует разных подходов для обеспечения их параллельной работы без жестких требований по синхронизации данных.

Предлагаемый алгоритм позволяет оптимально использовать доступную общую память в вычислительной системе, организуя параллельную обработку данных во всех без исключения стандартных блоках метода ПСМ с минимальным использованием средств синхронизации между вычислительными потоками.

В работе обсуждаются возможности, предоставляемые технологией OpenMP (начиная с версии 4.5) и особенности реализации параллельного алгоритма на архитектуре с распределённой общей памятью кластера Политехник-Торнадо (СПбПУ, Россия), типичной для существенной части суперкомпьютеров из российского списка TOP-50. Результаты применения алгоритма параллелизации по данным проанализированы с точки зрения эффективности работы основных блоков алгоритма ПСМ как по-отдельности, так и всего кода в целом. В качестве объекта расчета рассматривается обтекание тел вращения сверхзвуковым потоком в широком диапазоне чисел Кнудсена.

Список литературы:

1. Bird G. A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows. Clarendon Press, Oxford, 1994.
2. Bird G. A. The DSMC Method. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013.
3. Ivanov M., Markelov G., Taylor S., Watts J. Parallel DSMC strategies for 3D computations // Proc. parallel CFD'96. North Holland, Amsterdam. 1997. P.485–492.
4. Boyd I. D., Dietrich S. Scalar and parallel optimized implementation of the direct simulation Monte Carlo method // J. Comp. Phys. 1996. Vol.126. P.328–342.
5. Гришин И. А., Захаров В. В., Лукьянов Г. А. Параллелизация по данным прямого моделирования Монте-Карло в молекулярной газовой динамике // Препринт № 3–98. Институт высокопроизводительных вычислений и баз данных. Санкт-Петербург. 1998.
6. Быков Н. Ю., Горбачев Ю. Е., Лукьянов Г. А. Параллельное прямое моделирование методом Монте-Карло истечения газа в вакуум от импульсного источника // Теплофизика и аэромеханика. 1998. Т.5. № 3. С. 439–445.
7. Kashkovsky A. 3D DSMC computations on a heterogeneous CPU–GPU cluster with a large number of GPUs // AIP Conference Proceedings. 2014. Vol.1628. 192.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда N22-11-00078. Вычислительные ресурсы предоставлены суперкомпьютерным центром Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

УДК 533.7

УРАВНЕНИЯ ГАЗОДИНАМИКИ ПРИ ЧИСЛЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ, ПРЕВОСХОДЯЩЕМ ЧИСЛО СТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ ИНВАРИАНТОВ

Горбачев Ю.Е.¹, Шоев Г.В.²¹ Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1² Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, Институтский пр. 4/1

При моделировании сложных течений с физико-химическими превращениями чаще всего используются уравнения не только для газодинамических переменных, соответствующих сумматорным инвариантам (СИ) исходного уравнения Больцмана (УБ), но и для ряда других переменных. Для случая химически реагирующих газов таковыми являются, прежде всего, плотности химических компонентов, а, при более детальном описании, температуры внутренних степеней свободы, поступательные температуры различных компонентов и т.д. Если переменная не соответствует СИ, то в соответствующем уравнении газодинамики возникают источниковые члены (скорости реакций, скорости обмена импульсом, энергией и т.д.), которые определяются либо из феноменологических соображений, либо рассчитываются из УБ с использованием равновесных функций распределения.

В работах [1,2] было показано, что использование равновесных распределений может приводить к существенным неточностям в определении источниковых членов. Изначально метод, предложенный в [2], разрабатывался для расчета скоростей реакций [3,4], однако он был также применен к выводу скорости зародышеобразования при гомогенной нуклеации [5] и к выводу скорости обмена импульсом и энергии в смеси тяжелого и легкого газов [6].

В докладе рассмотрены особенности предлагаемого асимптотического метода решения уравнения Больцмана и приводится пример расчета теплового потока на поверхность конуса с юбкой (см. рис. 1) при обтекании смесью O_2/O с диссоциацией/рекомбинацией и неравновесным поступательно-колебательным обменом. Численное моделирование проводилось для условий из работы [7], соответствующих условиям экспериментального пуска 87. Для анализа полученного результата проводится сравнение с экспериментальными данными, с численными решениями, опубликованными в [7] и рассчитанными газодинамическим решателем HyCFS [8]. Последние два расчета выполнены с использованием модели Парка с некоторыми различиями.

Результаты расчетов показали удовлетворительное согласие с экспериментальными данными. Модель, предлагаемая в настоящей работе, предсказывает отрыв потока выше по течению ($x \approx 7,2$ см), чем другие модели. Также предлагаемая модель приводит к смещению пика теплового потока вниз по течению, что приводит к некоторому улучшению согласия с экспериментальными данными. Исследование на последовательности измельчающихся сеток, неопределенности в параметрах набегающего потока будут представлены в полном тексте доклада.

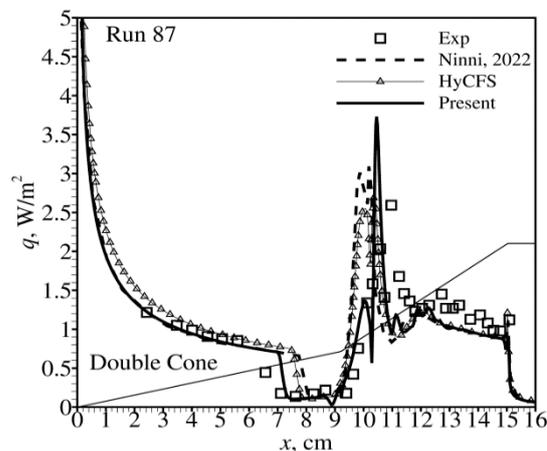


Рис. 1: распределения теплового потока на поверхность конуса с юбкой при обтекании смесью O_2/O с диссоциацией/рекомбинацией и неравновесным поступательно-колебательным обменом. Exp – экспериментальные данные, Ninni, 2022 – результаты расчета [7], HyCFS – результаты расчета решателем HyCFS, Present – результаты расчета в ANSYS Fluent с UDF, реализующими предлагаемую модель термохимической неравновесности.

Список литературы:

1. Колесниченко Е.Г. О различных методах вывода гидродинамических уравнений для химически реагирующих газов // МЖГ. 1984. № 3, С. 119-125.
2. Kolesnichenko E.G. Gorbachev Y.E. Gas-dynamic equations for spatially inhomogeneous gas mixtures with internal degrees of freedom. I. General theory // Appl. Math. Model. 2010. V. 34. P. 3778–3790.
3. Kolesnichenko E.G. Gorbachev Y.E. Two-temperature reaction and relaxation rates // Shock Waves. 2017. V. 27. P. 333–374.
4. Gorbachev Yu., Kunova O., Shoev G. A non-equilibrium dissociation and vibrational relaxation model for computational fluid dynamics simulations of flows with shock waves // Phys. Fluids 2021, V. 33, 126105, doi: 10.1063/5.0062628
5. Gorbachev Yu. Non-equilibrium Quasi-Chemical Nucleation Model // J. Stat. Phys. 2018. V. 171. N 2. P. 288-344. doi: 10.1007/s10955-018-2008-y
6. Gorbachev Yu. Renormalized Expressions for Momentum and Energy Exchange Rates for a Disparate Mass Gas Mixture // In RGD32 Proceedings. 2023. Ed. Rho Shin Myong, Kun Xu, Jong-Shinn Wu. Accepted for publication.
7. Ninni D., Bonelli F., Colonna G., Pascasio G. On the influence of non equilibrium in the free stream conditions of high enthalpy oxygen flows around a double-cone // Acta Astronaut. 2022. V. 201. P. 247-258. doi: 10.1016/j.actaastro.2022.09.017
8. Shershev A., Kudryatsev A., Kashkovsky A., Shoev G., Borisov S., Shkredov T., Polevshchikov D., Korolev A., Khotyanovsky D., Kratova Y. A Numerical Code for a Wide Range of Compressible Flows on Hybrid Computational Architectures // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2022. V.9. N.4, P.85–99. doi: 10.14529/jsfi220408

Работа выполнена при поддержке
гранта РФФ № 22-11-00080

УДК 533.59, 533.6.011.8, 539.198, 544.277.4/6, 544.435.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАССЕЙНИЯ ЧАСТИЦ СВЕРХЗВУКОВОГО КЛАСТИРОВАННОГО ПОТОКА МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ

Деринг Е.Д.^{1,2}, Дубровин К.А.^{1,2}, Зарвин А.Е.¹, Каляда В.В.¹

¹ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящее время одним из актуальных направлений исследований в газодинамике является изучение потоков с развитой кластеризацией. Оно интересно как с точки зрения фундаментальных исследований Ван-дер-Ваальсовых кластеров [1-3] так и для прикладных применений [4-6].

В [7] было обнаружено, что в условиях развитой конденсации помимо недорасширенной сверхзвуковой струи образуется вторичный спутный поток больших размеров, предположительно состоящий из крупных кластеров, способных преодолеть боковые вихри скачки струи («кластерный след»). Такие кластеры, сталкиваясь с частицами фонового окружения, уменьшаются в размерах и отклоняются в сторону оси течения, формируя собственный поток. Обнаруженный эффект инициировал проведение экспериментального исследования процесса рассеяния частиц кластированного потока на мономерных частицах методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии.

Работа выполнена на вакуумном экспериментальном газодинамическом стенде «ЛЭМПУС-2» отдела прикладной физики физического факультета НГУ [8]. Рассмотрено рассеяние атомов и кластеров небольшого размера в молекулярном пучке аргона, сформированном из сверхзвуковой кластированной струи, на частицах диоксида углерода. При различной степени конденсации в потоке измерена зависимость интенсивности сигнала масс-спектрометра от плотности газа в послескimmerной секции (рис. 1). С использованием данной зависимости, согласно [9], определялось сечение рассеяния частиц кластированного потока на фоновых частицах. При малой нуклеации в потоке ($\langle S \rangle \sim 50$) оно составило 38.7, 17.2 и 5.7 Å² для атомов, димеров и тримеров, соответственно.

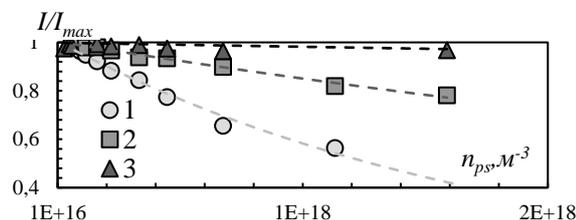


Рис. 1. Зависимость относительной амплитуды сигнала I/I_{max} , регистрируемого масс-спектрометром, от плотности газа в послескimmerной секции n_{pst} для атомов (1), димеров (2) и тримеров (3) аргона при среднем размере кластеров в потоке $\langle S \rangle \sim 50$.

При проведении исследований был обнаружен эффект изменения измеряемого сечения рассеяния атомов кластированного молекулярного пучка, постоянного при $\langle S \rangle < 200$, при развитии процесса конденсации в потоке (см. рис. 2). В докладе приводятся возможные объяснения данной зависимости, а также особенности использования метода молекулярно-пучковой масс-спектрометрии для исследования сверхзвуковых кластированных потоков.

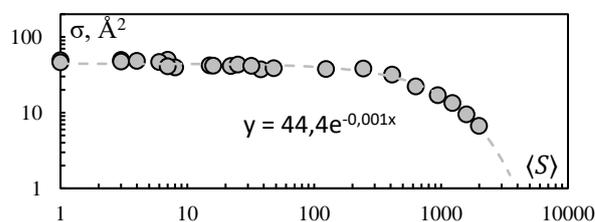


Рис. 2. Зависимость измеренного сечения рассеяния атомов аргона σ от среднего размера кластеров $\langle S \rangle$ в потоке.

Список литературы:

1. Hagena O. F. Nucleation and growth of clusters in expanding nozzle flows //Surface Science. 1981. Т. 106. №. 1-3. С. 101-116.
2. Ganeva M. et al. Angular and velocity distribution of nano-size cluster beams in a gas flow //Vacuum. 2014. Т. 110. С. 140-145.
3. De Martino A. et al. Average cluster size determination in supersonic beams from angular distribution measurements after scattering by a buffer gas //Zeitschrift für Physik D Atoms, Molecules and Clusters. 1993. Т. 27. С. 185-192.
4. Ceynowa F. A. et al. Arrays of size-selected metal nanoparticles formed by cluster ion beam technique //MRS Advances. 2018. Т. 3. №. 45-46. С. 2771-2776.
5. Toyoda N., Yamada I. Advancement of gas cluster ion beam processes for chemically enhanced surface modification and etching //Physics Procedia. 2015. Т. 66. С. 556-560.
6. Rattunde O. et al. Surface smoothing by energetic cluster impact //Journal of Applied Physics. 2001. Т. 90. №. 7. С. 3226-3231.
7. Зарвин А. Е. и др. О структуре сверхзвуковой струи в условиях развитой конденсации //Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41. №. 22. С. 74-81.
8. Zarvin A. E. et al. Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons //IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. Т. 45. №. 5. С. 819-827.
9. Леонас В. Б. Современное состояние и некоторые новые результаты метода молекулярного пучка //Успехи физических наук. 1964. Т. 82. №. 2. С. 287-323.

Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Прикладная физика» физического факультета НГУ при финансовой поддержке РФФ (№. 22-11-00080)

УДК 66.097.3:662

ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ПАРОВАЯ КОНВЕРСИЯ МЕТАНА В МИКРОКАНАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ

Димов С.В., Гасенко О.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Каталитическая паровая конверсия метана является основным способом промышленного производства водорода и синтез-газа (смесь оксида углерода и водорода) [1]. Использование кислорода в процессе конверсии позволяет уменьшить расходы на проведение реакции парового риформинга [2]. В процессе автотермического (окислительного) риформинга возможно получение синтез-газа с требуемым соотношением $H_2:CO$ 2-2.5 для синтеза метанола, Фишера-Тропша. Согласно расчетам по [3] при входном соотношении $CH_4:H_2O:O_2$ 0.42/0.42/0.16 можно достичь проведения реакции практически без подвода внешнего тепла со степенью конверсии более 90% с входной температурой 650 С. Для выполнения конверсии метана в микроканальных реакторах чаще используют катализаторы благородных металлов [4]. Опыты [4,5], проведенные с родиевым катализатором показали его высокую активность и стабильность при существенно меньших температурах, чем на никелевом катализаторе.

В данной работе проведено экспериментальное исследование окислительной паровой конверсии метана в микроканальном реакторе. Процесс исследовался на сборке корругированных пластин, с нанесенными на их поверхность катализатором (Рис. 1). Катализатор паровой конверсии метана имел состав 5%Rh/3%La₂O₃/2% BaO /гамма-Al₂O₃. Пластины фехрала Х23Ю5Т толщиной 250 мкм размером 14 x 1.2 см были очищены этиловым спиртом с применением ультразвука, травились в 0,1 М растворе HCl при 60оС в течение 30 мин, затем выдерживались при 1000оС в течение 4 часов и охлаждались в воде с закалкой. Прокатанные пластины прокатывали через пресс, так что толщина пластин с корrugацией увеличивалась вдвое. На корrugированные пластины был нанесен слой TiO₂ с целью ингибирования коррозии и увеличения адгезии катализатора к поверхности металла. Катализатор наносили аэрозольным способом (2549619 RU), прокаливали при 500 оС. Расходы входной газовой смеси устанавливались контроллерами расхода Bronkhorst, В опытах измерялись выходные расходы конденсата паров воды, газа.

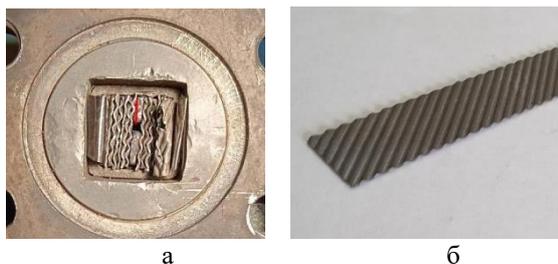


Рис.1. Микроканальный реактор для конверсии метана –а, б – гофрированный лист упаковки с нанесенным на поверхности пластин Rh катализатором.

Состав газовых продуктов реакций определялся с использованием хроматографов Маэстро, Кристалл. Температура в рабочем участке создавалась внешним электрическим нагревателем.

В процессе экспериментов было исследовано влияние соотношения метан кислород на выход продуктов реакции при разных выходных температурах реактора. На Рис.2 приведены выходы водорода при разном отношении метан-кислород(воздух) при условии одинакового времени контакта реагентов в реакторе. Это условие означает, что общий расход входной смеси одинаков, а соотношение компонент метан-воздух меняется. Выход водорода означает отношение расхода полученного водорода в результате реакции к входному расходу метана.

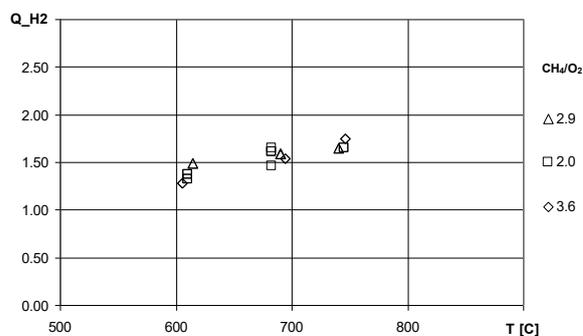


Рис.2 Выход водорода в процессе окислительного парового риформинга метана. при разном входном соотношении метан/кислород(воздух).

Показано, что при исследуемом общем расходе увеличении доли воздуха слабо влияет на выход водорода в реакторе с исследованным типом катализатора и корrugированных пластин.

Список литературы:

1. Zhang H., Sun Z., Yun Hang Hu Steam reforming of methane: Current states of catalyst design and process upgrading// Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. V 149. 111330.
2. Arutyunov V S, Krylov O V Oxidative conversion of methane// Russian Chemical Reviews 2005. V 74 (12) P.1111-1137.
3. Morley C. Gaseq chemical equilibrium program. See <http://www.gaseq.co.uk>.
4. Kuznetsov V.V., Vitovsky O.V., Gasenko O.A. Methane Steam Reforming in an Annular Microchannel with Rh/Al₂O₃ Catalyst // J. Eng. Therm. 2009. V/18. P. 187 – 196.
5. Daly F, Tonkovich L. Enabling offshore production of methanol by use of an isopotential reactor. 2004. In: Xinhe, B., Yide, X. (Eds.), Studies in Surface Science and Catalysis. Elsevier, P.415–420.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (ЕГИСУ НИОКР - 121031800215-4)

УДК 533.6.011.5

О ФОРМИРОВАНИИ ВНЕШНЕГО КЛАСТЕРНОГО ПОТОКА В СВЕРХЗВУКОВОМ ИСТЕЧЕНИИ

Дубровин К.А.^{1,2}, Зарвин А.Е.¹, Каляда В.В.¹, Яскин А.С.¹, Деринг Е.Д.^{1,2}

¹ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,

630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследования характера истечения газов из сопел различных конфигураций проводились на протяжении многих лет [1-6]. Получен спектр верифицированных теоретических и эмпирических моделей, описывающих процессы, протекающие в газовых потоках, и позволяющих с достаточной точностью моделировать и предсказывать газодинамику истечения без необходимости привлечения дополнительных лабораторных экспериментов. Однако вопросам влияния конденсации на газодинамику потоков до недавнего времени уделялось недостаточно внимания.

В работе [6] было обнаружено, что развитие конденсации в потоке при определенных газодинамических параметрах истечения приводит к формированию спутного потока, внешнего по отношению к «традиционной» струе. На Рис. 1 представлены визуализации истечений аргона из сверхзвуковых сопел в условиях малой (а) и развитой (б) конденсации. Полученные фотографии отредактированы в виде, обеспечивающем возможность представления на общем кадре отдельных участков струй, отличающихся значительным перепадом интенсивности свечения. При истечении из сверхзвуковых сопел в исследованных режимах наблюдается веретенообразная недорасширенная струя с X-образной конфигурацией в области смыкания боковых висячих скачков. Форму потока на Рис. 1,а можно назвать «традиционной», т.к. она зафиксирована в работах многих исследователей [1-5], а также является характерной для различных условий. В то же время в режиме с развитой конденсацией (Рис. 1,б) помимо «традиционной» струи наблюдается внешний поток, обладающий схожей формой, но со значительно большими размерами, сложной структурой и слабозатухающим свечением при возбуждении излучения электронным разрядом.

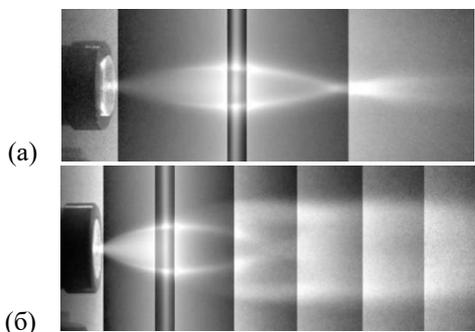


Рис. 1 Визуализация истечений аргона из сверхзвуковых сопел посредством электронного разряда в условиях малой (а) и развитой (б) конденсации.

Установлено, что данный поток не наблюдается за звуковыми соплами большого диаметра, при малых давлениях торможения, а также в потоках слабоконденсирующихся газов [7]. Нами было выдвинуто

предположение, что этот поток образуется в результате способности кластеров, обладающих большим импульсом, преодолеть висячие скачки уплотнения «традиционной» струи. Это предположение нашло также подтверждение в [8]. Данное течение зависит от процессов, происходящих в начальной струе, и ими порождается, ввиду чего в работе [6] оно получило название «кластерный след».

В настоящей работе методом электронно-пучковой визуализации исследовано влияние процесса кластерообразования на газодинамику сверхзвукового потока [7], представлены поправки к модели [3] для описания поперечных размеров сверхзвуковых потоков в условиях развитой конденсации [9-10], изучено влияние процесса проникания фонового газа в кластеризованный поток [11], а также проанализированы возможные причины и условия формирования «кластерного следа» [6, 10-11].

Список литературы:

1. Ashkenas H.Z., Sherman F.S. The structure and utilization of supersonic free jets in low density wind tunnels // 4th RGD Proceedings (Academic Press, New York). 1966. V.2. P.84.
2. Кисляков Н.И., Ребров А.К., Шарифутдинов Р.Г. О структуре высоконапорных струй низкой плотности за сверхзвуковым соплом // ПМТФ. 1975. Т.2. С.42-52.
3. Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н. Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия 2. Истечение в затопленное пространство // ФХКГД. 2012. Т.13. №2. С.1-26.
4. Chen G., Boldarev A.S., Geng X., et al. The radial dimension of a supersonic jet expansion from conical nozzle // AIP Advances. 2016. V.6. P.115015.
5. Sahoo D., et al. Shock-related unsteadiness of axisymmetric spiked bodies in supersonic flow // Exp. in Fluids. 2021. V.62(89). P.1-21.
6. Зарвин А.Е., Яскин А.С., Каляда В.В., Ездин Б.С. О структуре сверхзвуковой струи в условиях развитой конденсации // ПЖТФ. 2015. Т.41. В.22. С.74-81.
7. Дубровин К.А. и др. Исследование на малогабаритном газодинамическом комплексе: идентификация вторичного потока при истечении кластеризованной сверхзвуковой струи в разреженное пространство // ПМТФ. 2018. Т.59. №5. С.48-58.
8. Новопашин С.А., Перепелкин А.Л., Ярыгин В.Н. Взаимодействие кластеров CO₂ с диском Маха // Сб. трудов. Физика кластеров. Новосибирск. 1987. С. 169-172.
9. Зарвин А.Е., Яскин А.С., Каляда В.В. Влияние конденсации на размеры сильно недорасширенных струй при истечении в разреженное затопленное пространство // ПМТФ. 2018. Т.59. В.1. С.99-106.
10. Dubrovin K.A., Zarvin A.E., Kalyada V.V., Yaskin A.S. Influence of the outflow initial parameters on the transverse dimensions of underexpanded argon jets in presence of condensation // Vacuum. 2022. V.207. P.111651.
11. Дубровин К.А., Зарвин А.С., Каляда В.В., Яскин А.С. Причины свечения аномального вторичного потока в сверхзвуковых кластеризованных струях, возбужденных высоковольтным электронным пучком // ПЖТФ. 2020. Т.46. В.7. С.32-35.

Работа выполнена в Новосибирском государственном университете при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-11-00080)

УДК 536.7

ТЕРМОДИНАМИКА РАВНОВЕСНАЯ, НЕРАВНОВЕСНАЯ, ДИСКРЕТНАЯ. ЕЁ ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НА ОСНОВЕ КВАНТА ДЕЙСТВИЯ

Дулин М.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1*Посвящается 90-летию академика Реброва Алексея Кузьмича*

В предыдущем докладе [1] на СТС 38 был получен необычный результат, что **тепловое расширение** элементов таблицы Менделеева в твёрдом состоянии происходит за счёт обмена **квантами действия h** , как и было обнаружено Планком в далёком 1900 году, а не квантами энергии, как принято считать. Этот результат позволяет не только по-новому рассмотреть классическую термодинамику, феноменологическую по сути, но и считать её дискретной, а также включить в неё неравновесные процессы на равных основаниях с равновесными.

Первый закон или начало термодинамики говорит о **сохранении энергии** в системе. В дифференциальной форме он формулируется как $dU = TdS - pdV$, где U , S , V – внутренняя энергия, энтропия, объём системы, а T , p – температура и давление, соответственно. Умножение правой и левой части уравнения на достаточно малое время τ , требуемое для обмена квантами энергии $\varepsilon = h/\tau$ системы с окружающей средой, превращает размерность уравнения в размерность действия. Тем самым, основной закон термодинамики становится **законом сохранения полного числа квантов действия**. Его физический смысл теперь заключается в том, что кванты, переданные в систему, превращаются либо в тепло (первый член правой части), либо в работу (второй член), и *vice versa*.

Второе начало термодинамики вводит понятие **энтропии S** и утверждает, что в изолированной системе энтропия становится **максимальной**, когда система достигает термодинамического равновесия. В нашем представлении о кванте действия как о дискретном элементе тепла и работы [1] а также в соответствии с его распределением по элементам системы в целочисленном квантовом эффекте Холла [2] энтропия представляет собой **логарифм полного числа распределений** многих квантов h по элементам системы. Причём их распределением как по элементам пространства, доступным системе, так и по элементам времени [3]. В этом случае К. Ровелли называет время термодинамическим, и можно показать, что максимум энтропии в системе при её равновесии связан с **минимумом** этого времени или известным **принципом наименьшего действия**.

С энтропией тесно связано понятие **температуры T** , объективное существование которой представляет собой нулевое начало термодинамики. В полном соответствии с представлением о квантах действия феноменологическая температура dU/dS при постоянном объёме становится просто **потоком квантов действия** из одной системы в другую. При равенстве потоков системы находятся в тепловом равновесии, иначе тепло следует от горячего тела к холодному.

Третье начало термодинамики говорит о стремлении энтропии вблизи абсолютного нуля к **нулю** (константе). Это полностью соответствует ранее сказанному об энтропии как логарифму числа возможных распределений кванта действия.

Таким образом, представление о **кванте действия** позволяет не только обосновать классическую термодинамику, но рассматривать её в рамках комбинаторики **дискретной** и **допустимой** для малого числа частиц в системе.

Попытки соединить равновесную термодинамику с неравновесной в единое целое, отыскав в последней некую универсальную функцию, **экстремум** которой определял бы развитие системы, существовали всегда. Например, в противовес гипотезе Пригожина о минимуме производства энтропии [4] в середине прошлого века появилась идея, что **производство энтропии максимизируется** в ходе эволюции неравновесной системы [5]. Но консенсуса в этом вопросе до сих пор нет.

В нашем институте работы академиком С.А. Алексеенко и Д.М. Марковича по исследованию образования **когерентных структур в закрученных потоках** навели на мысль об определяющей роли **принципа максимального переноса действия**. Конечно, в виде его квантов действия h . Ведь этот квант можно представить не только в виде энергии как у фотона $h = \varepsilon\tau$, но и импульса частицы $h = p\lambda$ (по де Бройлю), её спина $h = 2\pi\hbar$ или момента импульса и даже электрического заряда, умноженного на квант магнитного потока: $h = e\mu$. В такой формулировке предложенный принцип удовлетворял бы и частному принципу максимального производства энтропии в качестве конечной цели неравновесного процесса [5], и частному случаю Пригожина [4] для минимального производства энтропии внутри образованных когерентных структур, и даже принципу наименьшего действия, когда рассматривается движение свободной одиночной частицы.

Список литературы:

1. Дулин М.Н. Обнаружение фермионных возбуждений электронов в атомах при тепловом расширении твёрдых тел // Тезисы. XXXVIII Сибирский теплофизический семинар. 2022, с. 79.
2. Wei H.P. et al. Experiments on delocalization and universality in the integral quantum Hall effect Phys.Rev.Lett., 1988, v.61, p.1294.
3. Ровелли К. Нереальная реальность. Путешествие по квантовой петле. Издательство «Питер», 2020, 182 с.
4. Пригожин И.Р. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках. М.:Наука, 1985.
5. Мартюшев Л.М. Принцип максимума производства энтропии. УФН, 2021, т.191, №6, с.586.

УДК 54.057

СИНТЕЗ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУИ СМЕСИ ГАЗОВ, АКТИВИРОВАННЫХ СВЧ РАЗРЯДОМ.**Емельянов А.А., Пинаев В.А., Плотников М.Ю., Ребров А.К., Тимошенко Н.И., Юдин И.Б.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Большое удельное электрическое сопротивление алмаза, хорошие диэлектрические свойства, высокие значения твердости и теплопроводности, химическая стабильность и прозрачность в широком диапазоне длин волн делают алмаз перспективным для различных механических, термических, оптических и электронных применений [1-4].

Одним из известных методов газофазного синтеза алмазных покрытий является осаждение из активированной в СВЧ разряде смеси газов-предшественников при диффузионной транспортировке фрагментов к подложке. В последние годы активно развивается газоструйная модификация этого метода [5-11], основанная на использовании высокоскоростной струи для доставки к подложке активированных в СВЧ разряде компонент смеси. Особенностью рассматриваемого метода является использование двух камер: разрядной - для активации газов СВЧ разрядом и камеры осаждения для синтеза алмазных структур на поверхности подложки. В камере осаждения при используемом перепаде давления между разрядной камерой и камерой осаждения происходит сверхзвуковое расширение активированного газа. Это обеспечивает ряд новых возможностей: активация газа в разрядной камере в широком диапазоне давлений, не зависящих от давления в камере осаждения, и возможность реализации различных режимов осаждения в широком диапазоне удельных массовых потоков компонентов смеси к подложке.

К настоящему времени известно, что процесс синтеза алмаза определяется концентрацией атомарного водорода и продуктов разложения метана у поверхности подложки. Образование данных компонент происходит при возбуждении смеси водорода с метаном в СВЧ разряде и их последующем разложении. Добавление аргона позволяет рассчитывать на существенное увеличение скорости синтеза алмаза вследствие увеличения температуры в плазменном облаке и соответствующего повышения степени диссоциации водорода [12].

Основные цели проведенной работы:

1) исследование процесса осаждения алмазных плёнок в широком диапазоне определяющих параметров (расход водорода, концентрация метана, добавка аргона);

2) численное исследование газодинамической структуры высокоскоростных струй в режимах, соответствующих экспериментальным;

3) диагностика плазмы СВЧ разряда для определения температуры и состава смеси методом оптической эмиссионной спектроскопии;

4) разработка методики эффективного охлаждения подложки.

Сканирующая электронная микроскопия используется для изучения морфологии. Наличие углеродсодержащих фаз определялась с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света.

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты: 1) реализован метод определения зависимости концентрации атомарного водорода и температуры компонент в плазме по измерениям интенсивностей спектральных линий; 2) установлены закономерности влияния ряда параметров осаждения на свойства алмазных покрытий, получаемых газоструйным методом; 3) достигнута рекордная скорость синтеза алмазного покрытия (до 200 мкм в час) для газофазного осаждения алмазных покрытий из активированной в СВЧ разряде смеси газов-предшественников: водорода, метана и аргона.

Полученные результаты важны для дальнейшей оптимизации методики газоструйного осаждения алмазов с использованием для активации газов-предшественников микроволнового излучения.

Список литературы:

1. May P.W. Diamond thin films: a 21st-century material// Philos. Trans. Rog. Soc. London. Ser A. 2000. V. 358. P. 473 – 495.
2. Сергейчев К.Ф. Алмазные CVD-покрытия режущих инструментов (обзор)// Успехи прикл. физики. 2015. Т. 3, № 4. С. 342-376.
3. Хмельницкий Р.А. Перспективы выращивания монокристаллического алмаза большого размера // Успехи физ. наук. 2015. Т. 185, № 2. С. 143 – 159.
4. Butler J. E., Mankelevich Y. A., Cheesman A., et al. Understanding the chemical vapor deposition of diamond: recent progress// J. Phys.: Condens. Matter. 2009. V. 21. P. 364201.
5. Rebrov A.K., Bobrov M.S., Emelyanov A.A., et al. Experience in the synthesis of diamond from a supersonic microwave plasma jet// Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2019. V.7(2) P.131–137.
6. Ребров А.К., Емельянов А.А., Плотников М.Ю. и др. Синтез алмаза из высокоскоростного потока СВЧ-плазмы // Докл. АН. Техн. науки. 2020. Т.490, № 1. С.48-51.
7. Emelyanov A.A., Pinaev V.A., Plotnikov M.Yu., et al. Effect of methane flow rate on gas-jet MPCVD diamond synthesis// J. Phys. D: Appl. Phys. 2022 V. 55(20). 205202.
8. Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Ребров А.К. и др. Использование сверхзвуковой струи газа, активированного в микроволновом разряде, для осаждения алмаза// Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2021. № 1. С. 106–114.
9. Емельянов А.А., Пинаев В.А., Плотников М.Ю. и др. Оптические и газодинамические измерения в потоке плазмы СВЧ разряда в условиях газоструйного синтеза алмаза// ПМТФ. 2022. Т.63, №3. С.54-61.
10. Yelissev A.P., Emelyanov A.A., Rebrov A.K., et al. Structure of a diamond deposited from microwave plasma by a new gas-jet method// Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2021. V.94. 105386.
11. Федосеева Ю.В., Городецкий Д.В., Баскакова К.И. и др. Газофазный синтез легированной азотом алмазной плёнки из высокоскоростного потока микроволновой плазмы// Журнал структурной химии. 2022. Т. 63, № 7. 98811.
12. Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Yurov V.Y., et al. High-rate growth of single crystal diamond in microwave plasma in CH₄/H₂ and CH₄/H₂/Ar gas mixtures in presence of intensive soot formation // Diamond & Related Materials. 2016. V. 62. P. 49–57.

УДК 54.057

**ГАЗОСТРУЙНЫЙ MPCVD СИНТЕЗ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ
НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ РАЗЛИЧНОГО МАТЕРИАЛА.****Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Тимошенко Н.И., Юдин И.Б.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящее время одним из наиболее используемых методов для получения алмазных покрытий хорошего качества является химическое осаждение из газовой фазы с активацией в СВЧ – разряде (Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition - MPCVD) [1,2]. Известно, что процесс синтеза алмаза на поверхности определяется концентрацией у подложки атомарного водорода и продуктов разложения метана [3]. Образование данных компонент происходит при активации смеси водорода с метаном в СВЧ разряде и их последующем разложении.

В представленной работе рассматривается газоструйная модификация MPCVD метода, позволяющая перейти от низкоскоростного диффузионного процесса переноса «строительного» материала к подложке к струйному переносу [4-6]. Особенностью рассматриваемого подхода является использование двух камер: разрядной - для активации газов СВЧ разрядом и камеры осаждения для синтеза алмазных структур на поверхности подложки. Из разрядной камеры в камеру осаждения происходит сверхзвуковое расширение активированного газа. Это обеспечивает, в частности, возможность реализации различных режимов осаждения в широком диапазоне удельных массовых потоков и энергий активированных компонентов смеси к подложке. Все это приводит к возможности существенного отличия состояния участвующих в синтезе частиц при «классическом» методе и газоструйном.

Показана возможность достижения больших скоростей синтеза алмаза из метановодородной смеси этим методом [5]. Добавление аргона позволяет существенно увеличить скорость синтеза алмаза вследствие увеличения температуры в плазменном облаке и соответствующего повышения степени диссоциации водорода [3].

Одна из проблем рассматриваемого метода связана с большим тепловым воздействием потока активированного газа на подложку. Осаждение алмаза на материалах с низкой теплопроводностью ставит проблему создания держателя подложки, который обеспечит ее сохранность в условиях синтеза. Использование аргона приводит к увеличению теплового потока и усугублению проблем сохранности подложки при тепловом воздействии.

Естественным развитием метода являлась работа по разработке методики газоструйного осаждения на подложки из различных материалов, в частности из материалов с невысокой термической стойкостью. В большинстве случаев осаждение алмазных покрытий осуществляется на подложку с температурой 700 – 1000С. Поэтому на первом этапе развития газоструйного метода алмаз синтезировался на молибденовых

подложках [4-6]. Однако высокая температура подложки ограничивает получение алмазных пленок на термически не стойких материалах с низкой теплопроводностью, применяемых во многих промышленно важных областях. Важнейшей задачей при синтезе алмаза на подложке с низкой теплопроводностью в условиях ее нагрева струей активированного газа является обеспечение эффективного охлаждения за счет контакта подложки с охлаждаемым основанием. В [7] разработан охлаждаемый подложкодержатель с использованием металлического расплава для улучшения отвода тепла и проведен газоструйный синтез алмазных структур на кремниевой подложках.

В ходе проведенных исследований получены алмазные покрытия на кварце, стали, нитриде титана, карбиде вольфрама, кремнии, алмазе. Стимуляция зародышеобразования алмаза нанесением на подложку дополнительных центров нуклеации не проводилась. Исследовались возможности осаждения алмазных покрытий как из метановодородной смеси, так и с добавкой аргона. В частности, показана возможность синтеза алмазного покрытия со скоростью до 200 мкм в час из активированной в СВЧ разряде смеси газов-предшественников: водорода, метана и аргона.

Сканирующая электронная микроскопия использована для изучения морфологии. Наличие углеродсодержащих фаз определялась с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света.

Полученные результаты важны для дальнейшей оптимизации методики газоструйного осаждения алмазов на подложки из различных материалов с использованием для активации газов-предшественников микроволнового излучения.

Список литературы:

1. Хмельницкий Р.А. Перспективы выращивания монокристаллического алмаза большого размера // Успехи физ. наук. 2015. Т. 185, № 2. С. 143 – 159.
2. Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Yurov V.Y., et al. High-rate growth of single crystal diamond in microwave plasma in CH₄/H₂ and CH₄/H₂/Ar gas mixtures in presence of intensive soot formation// *Diamond & Related Materials*. 2016. V. 62. P. 49–57.
3. Martyanov A., Tiazhelov I., Savin S., et al. Synthesis of Polycrystalline Diamond Films in Microwave Plasma at Ultrahigh Concentrations of Methane// *Coatings* 2023, 13, 751.
4. Rebrov A.K., Bobrov M.S., Emelyanov A.A., et al. Experience in the synthesis of diamond from a supersonic microwave plasma jet// *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2019. V.7(2) P.131–137.
5. Ребров А.К., Емельянов А.А., Плотников М.Ю. и др. Синтез алмаза из высокоскоростного потока СВЧ-плазмы // Докл. АН. Техн. науки. 2020. Т.490, № 1. С.48–51.
6. Emelyanov A.A., Pinaev V.A., Plotnikov M.Yu., et al. Effect of methane flow rate on gas-jet MPCVD diamond synthesis// *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2022 V. 55(20). 205202.
7. Emelyanov A.A., Plotnikov M. Yu., Timoshenko N.I., Yudin I.B. Effective cooling of substrates with low thermal conductivity under conditions of gas-jet MPCVD diamond synthesis// *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol.2119(1). 012119.

УДК 533.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ РАЗРЕЖЕННЫХ СТРУЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ КЛАСТЕРЕ УНИВЕРСИТЕТА

Зарвин А.Е., Дубровин К.А., Каляда В.В., Художитков В.Э., Яскин А.С., Деринг Е.Д.

Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Острая необходимость лабораторного моделирования процессов истечения сверхзвуковых струй в сильно разреженную среду (вакуум) возникла с началом эры космонавтики. В СССР существенный рывок в экспериментальных возможностях наземного моделирования процессов в космосе связан с созданием в Институте теплофизики СО РАН коллективом исследователей под руководством А.К. Реброва уникального комплекса крупных газодинамических установок [1-3]. Были заложены основные направления исследований, разработаны ставшие в последнее время традиционными диагностические методы лазерной, электронно-пучковой и молекулярно-пучковой диагностики. Этот опыт использован при создании усилиями учеников А.К.Реброва университетского лабораторного комплекса вакуумных газодинамических установок в Новосибирском государственном университете. Отличительной особенностью вузовских исследований является ограничение масштабов экспериментальных установок и активное привлечение к работам студентов и аспирантов. С 1983 года начались научные исследования по тематике разреженных газов в отделе прикладной физики НГУ. Экспериментальная база для этих исследований создавалась и активно развивалась с 1985 по настоящее время. За этот период изготовлен и включен в исследовательский процесс комплекс экспериментальных стендов [4-8]. В рамках учебного процесса был создан «нестандартный практикум» физического факультета, оснащенный рядом небольших вакуумных установок [9].

Целью настоящего сообщения является изложение опыта и результатов работ в области динамики разреженных газов в отделе прикладной физики физического факультета НГУ.

Одним из важнейших ограничений при использовании небольших вакуумных установок для исследований газодинамики разреженных сверхзвуковых потоков является лимитированная предельная скорость откачки вакуумной насосной системы. Наиболее перспективным методом решения этой проблемы является переход от непрерывного к импульсному истечению струй. При этом импульсы должны быть многократно повторяемыми для повышения отношения полезный сигнал – шум, достаточно короткими, чтобы фоновое давление в вакуумном объеме не изменилось значительно за время истечения, в то же время достаточно длительными, чтобы установился режим квазистационарного истечения для возможности моделирования стационарного процесса, а также достаточным для получения информации системами диагностики. Необходимые конструкции клапанов, выбор и обоснование режимов истечения, адаптация традиционных

методов диагностики были отлажены при исследованиях на стендах УДИАВ [4] и ЛЭМПУС [5] и будут рассмотрены в докладе.

Наши экспериментальные исследования условно можно разделить на пять основных направлений. 1) Моделирование струй космических аппаратов для заказчиков из Роскосмоса. Реализация режимов, необходимых для заказчиков при миниатюризации моделей, обоснование подобия лабораторных условий с натурными осуществлены на стендах ПХМ [6] и ЛЭМПУС-2 [7]. Направления 2) - изучение процессов кластерообразования в сверхзвуковых потоках; 3) - моделирование истечения жидкости через микроотверстия в вакуум; 4) - поиск условий эффективной конверсии углеводородов, а также инициации других химических реакций в разреженных струях и пучках, в том числе с вовлечением в процесс кластеров - реализованы на стендах [5-8]. 5) Использование кластеров для финишной, до шероховатости менее 1 нм, полировки поверхности различных материалов. Для этих целей была сконструирована и построена технологическая установка КЛИУС [8].

В работе представлены результаты по данным направлениям исследований.

Список литературы:

1. Бочкарев А.А., Великанов Е.Г., Ребров А.К. и др. газодинамические установки низкой плотности // В кн. «Экспериментальные методы в динамике разреженных газов». Под ред. С.С. Кутателадзе. Новосибирск. ИТФ АН СССР. 1974. С. 6-23.
2. Приходько В.Г., Храмов Г.А., Ярыгин В.Н. Крупномасштабная криогенно-вакуумная установка для исследования газодинамических процессов // ПТЭ. 1996. № 2. С. 162–164.
3. Ярыгин В.Н., Герасимов Ю.И., Крылов А.Н. и др. Газодинамика космических кораблей и орбитальных станций (обзор) // Теплофиз. Аэромех. 2011. Т. 18. № 3. С. 345-372.
4. Гартвич Г.Г., Зарвин А.Е., Мадирбаев В.Ж. и др. Использование электронно-пучковой диагностики для исследования газовых потоков фтористого водорода // Журнал ПМТФ. 1993. Т. 34. № 5. С. 150-156.
5. Зарвин А.Е., Коробейщиков Н.Г., Мадирбаев В.Ж. и др. Универсальная малогабаритная вакуумная установка для газокINETических исследований // ПТЭ, 2000. № 5. С. 64-70.
6. Зарвин А.Е., Каляда В.В. и др. Экспериментальная установка для плазмохимических исследований // ПТЭ. 2016. 6. С. 50-56.
7. Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh., et al. Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. V. 45. Issue 5. P. 819-827.
8. Korobeishchikov N.G., Nikolaev I.V., Roenko M.A.. Effect of argon cluster ion beam on fused silica surface morphology // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2019. V. 438. P. 1-5.
9. Задорожный А. М., Золкин А. С., и др. Кафедра общей физики // Ж. Вестник НГУ. Сер. Физика. 2006. Т. 1. Вып. 1. С. 88-104.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSUS-2020-0039) с использованием оборудования ЦКП «Прикладная физика» при ОПФ ФФ НГУ

УДК 533.6.071.8, 536.2.

ТЕРМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ТОРЦА КАНАЛА

Знаменская И.А., Муратов М.И.,

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества
119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

При отражении ударной волны от торца канала ударной трубы устанавливается тепловой поток между нагретой газовой средой и твердой стенкой [1]. В реальных течениях состояние газа, а также распределение параметров в канале за отраженной от плоского торца ударной волной определяются неоднородностями потока перед отраженным скачком. Формирование вязкого динамического пограничного слоя за прошедшей ударной волной влияет на быстрое нарастание пограничного теплового слоя. Это требует учета неадиабатичности процессов с теплообменом на границе заторможенного объема газа с внешней, относительно стенда, средой.

В данной работе, на основе методики инфракрасной термографии, производится панорамная визуализация динамики тепловых полей внешней поверхности стенда (торцевой вставки) при отражении от неё ударной волны с числом Маха $M = 1,5$. Анализируется влияние пограничного слоя на теплообмен за отраженной ударной волной. Преимуществом использования термографической визуализации является уменьшение количества регистрируемых тепловых процессов, как в случае с инвазивными разрушающими измерениями, а также возможность рассмотрения нестационарных конвективных потоков при больших пространственных градиентах измеряемых величин [2].

Эксперименты проводились на однодиафрагменном ударном стенде УТРО-3 – двухсекционная ударная труба прямоугольного поперечного сечения с камерами высокого и низкого давлений, разделенными тонкой полимерной диафрагмой. Длина камер высокого и низкого давлений — 52 и 211 см соответственно; толщина стенок 2 мм; сечение 24 мм x 48 мм. В конец камеры низкого давления вмонтирована тонкая пластина из нержавеющей стали толщиной 0.25 мм – торцевая вставка. Рабочим и толкающим газами были воздух и гелий соответственно. В качестве приемника инфракрасного излучения с торца ударной трубы после отражения ударной волны использовался высокоскоростная камера Flir SC 7700 (рабочий диапазон 3.7–4.8 мкм).

В случае значительной неоднородности поля течения перед отраженной ударной волной могут возникать режимы, при которых распространение отраженного скачка по ядру потока и пограничному слою, приводит к расщеплению волны с образованием λ – конфигураций [3]. Формирование подобных бифуркационных структур связано с втеканием в застойную зону части пограничного слоя за счет разности давлений между отраженной волной и зоной торможения в пограничном слое. Удаляясь от поверхности отражения, структура скачка оставляет за собой ускоренный

быстро турбулизирующийся газ с неустойчивой вихревой поверхностью, формирующей на стенке отражения разрастающийся настенный поток. Соответственно реализуется зависимость динамических тепловых потоков поверхности отражения от удаления от центра канала. Отмечается неоднородность поля тепловых потоков для различных областей течения – ядра потока и пограничных зон у стенок канала (см. рис. 1). Выражается уширяющаяся со временем граница перехода между областями.

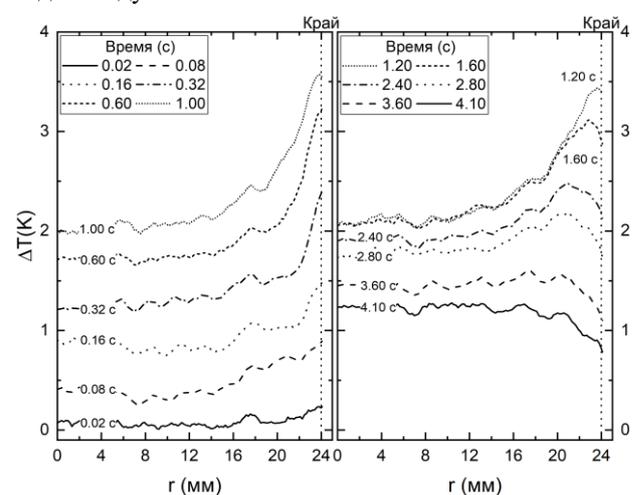


Рис. 1 Распределение температуры вдоль $(X, 0)$ торцевой вставки в различные моменты времени.

В данном случае градиент температуры теплового пограничного слоя в том числе определяется и теплофизическими свойствами стенки канала, а безразмерная температура поверхности обратно пропорциональна коэффициенту тепловой активности материала торцевой стенки [1]. У торца канала возникает нестационарный и неоднородный тепловой пограничный слой, динамика которого анализируется с помощью полученных на стенде данных инфракрасной термографии с высоким временным разрешением.

Список литературы:

1. Кутутеладзе С.С. Основы теории теплообмена. Издание 5. М.: Атомиздат. 1979. 416 с.
2. Знаменская И.А., Коротева Е.Ю., Муратов М.И., Штеменко Л.С., Докунина О.И., Сысоев Н.Н. Регистрация нестационарной динамики тепловых потоков в ударных трубах на основе высокоскоростной термографии// ВМУ. 2022. 3. № 6. С. 82-88.
3. Kleine H., Lyakhov V.N., Gvozdeva L.G., Gronig H. Bifurcation of a reflected shock wave in shock tube// Shock Waves. 1992. С. 261-266.

Работа выполнена при поддержке
гранта РНФ 22-29-00652

УДК 536.6

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПOTЕРЬ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПРИ СИНТЕЗЕ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ**Зобов К.В.^{1,2}, Хартаяева Э.Ч.², Бардаханов С.П.^{1,2}, Труфанов Д.Ю.¹, Гапоненко В.Р.¹**¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1² Институт Физического Материаловедения СО РАН, 670047, Россия, Респ. Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

Получение нанопорошков чистых металлов и сплавов является актуальной проблемой современных технологий, так как они могут быть использованы для модификации жидкостей, полимеров, сплавов.

Существует ряд методов получения таких наночастиц с разным уровнем производительности и различными структурными особенностями получаемых частиц. Однако не многие из них высокопроизводительны и универсальны с точки зрения материала частиц. Методика получения наночастиц исследуемая в данной работе заключается в испарении исходного материала непрерывным пучком электронов высокой энергии при атмосферном давлении. Пары уносятся потоком газа носителя и конденсируются в ультрадисперсные частицы. При получении частиц металлов в качестве газа носителя используется инертный газ. Такой источник нагрева позволяет испарять и легкоплавкие [1,2] и тугоплавкие материалы [3].

Не смотря на простоту принципа получения, технологически, — это сложный процесс. Ускоритель электронов создаёт источник нагрева высокой плотности мощности, обладающий высоким уровнем радиационного излучения. Это ведёт к трудностям наблюдения за процессами, происходящими в испарительной камере. Наиболее стабильной системой контроля процесса стала система измерения калориметрии потоков охлаждения испарительной камеры [4]. Эта система включает в себя датчики расхода охлаждающей жидкости и измерения изменения её температуры. Испарительная камера сегментирована, и каждый сегмент обрабатывается отдельно. Данные пишутся на компьютер вместе с током пучка и другими измеряемыми параметрами и анализируются при помощи специального программного модуля.

Данная методика использовалась для многих металлов. При этом снималась калориметрия, обычно она исследовалась внутри одной серии как относительное значение, используемое для контроля стабильности процесса, однако опыт использования дал уверенность не только в работоспособности, но и в приемлемой точности калориметрического оборудования для проведения количественного анализа и

сравнения разных конфигураций реактора, тигля типов сырья. Разработанная и апробированная в течении последних лет модель для определения температуры в зоне кипящего расплава по лучистому теплотокоту также может быть расширено применена для предшествующих производственных пусков. Использование данной методики контроля позволяет получать больше информации для оптимизации процессов синтеза не только чистых металлов, но также и некоторых сплавов [5].

В работе проведено сравнение калориметрии испарения для различных видов исходных материалов, испаряемых в конфигурации с графитовым тиглем в инертной атмосфере аргона. Проводится отделение влияния тигля от влияния самого сырья. Показано насколько сопоставимы величины теплотокотов с количеством усвоенного материалом тепла, и насколько чувствительны показания к геометрическим параметрам испарительной камеры и тигля. Проводится сопоставление теплотокотов через излучение, через прямой контакт, через газ носитель.

Список литературы:

1. Завьялов А.П., Зобов К.В., Чакин И.К. и др. Синтез нанопорошков меди методом испарения электронным пучком при атмосферном давлении инертного газа // Российские нанотехнологии. 2014. Т. 9, № 11-12. С. 53-57.
2. Nomoev A.V., Khartaeva E.C., Syzranthev V.V. et al. Receiving copper nanoparticles: Experiment and modelling // Solid state phenomena 2019. Vol. 288. P. 140-147.
3. Труфанов Д.Ю., Зобов К.В., Бардаханов С.П. и др. Применение метода испарения вещества высокоэнергетическим пучком электронов для получения нанопорошка вольфрама // Сибирский физический журнал. 2019. Т. 14. № 4. С. 17-27.
4. Zobov K.V., Zavjalov A.P., Bardakhanov S.P. et al. Analysis of the thermodynamics features of the pure metals and oxides nanopowders obtaining by the high-energy electron beam evaporation method // AIP Conference Proceedings 2023 Vol. 2504. P. 030071.
5. Khartaeva E.C. et al. Nanopowders Created by Irradiating Brass with Relativistic Electrons // Materials Science Forum. 2023. Vol. 1083, P. 61–69.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ госрегистрации 121030500149-8)

УДК 533.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕМПИРУЮЩИХ МОМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ «ПОДВИЖНАЯ СТЕНКА»

Кашковский А.В., Королёв А.А.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Важными аэродинамическими характеристиками летательного аппарата (ЛА) являются статическая и динамическая устойчивости. Статическая устойчивость - способность ЛА создавать силы и моменты, стремящиеся вернуть аппарат в исходное положение равновесия, в случае если аппарат выведен из равновесия. Динамическая устойчивость - способность ЛА создавать моменты, возникающие в процессе возмущённого движения, которые направлены на затухание колебаний ЛА. Такие моменты называются демпфирующими.

При сходе с орбиты, во время полёта в атмосфере Земли, космические возвращаемые аппараты (ВА) могут терять динамическую устойчивость, из-за чего возникают нежелательные ситуации, такие как автоколебательные режимы движения относительно центра масс. Для избегания таких ситуаций необходимо предварительно определять демпфирующие характеристики ВА, что позволит обеспечить безопасность и контролируемость таких спусков с орбиты.

Демпфирующие характеристики определяются, в основном, экспериментальным путём в аэродинамических трубах для моделей ВА.

Поскольку численные методы выходят на лидирующие позиции в вопросе исследования аэродинамики ЛА, возрастает интерес к определению демпфирующих характеристик численным путём. Возможность проведения численного моделирования для определения демпфирующих моментов может ускорить процесс исследования ЛА, а также позволит предотвратить ошибки проектирования.

Поэтому существует актуальность разработки новых численных методик, которые позволят с большей точностью определять необходимые демпфирующие характеристики для ВА.

Граничное условие «подвижная стенка»

Было разработано граничное условие «подвижная стенка» для программного комплекса NuCFS-R [1]. Исследование демпфирующих характеристик проводится для ВА, совершающего колебательные движения вокруг центра масс. В каждой поверхностной ячейке, на каждом вычислительном шаге вычисляется вектор скорости по гармоническому закону (формула 1).

$$\vec{\omega} = \omega_{\max} \sin(2\pi \nu t + \varphi_0) \times \vec{r} \quad (1)$$

где $\vec{\omega}$ – вектор скорости, ω_{\max} – амплитуда скорости, ν – частота колебаний, φ_0 – фаза колебаний, \vec{r} – вектор к центру ячейки.

Эта скорость используется в граничных условиях на поверхностных ячейках, при этом сама стенка не движется, а расчётная сетка не перестраивается.

Демпфирующие моменты определяются как производная коэффициента момента C_m по угловой скорости.

Исследование влияния частоты и амплитуды скорости на коэффициент момента

Поскольку частота колебаний и амплитуда скорости являются основными параметрами, влияющими на коэффициент момента, было проведено исследование влияния этих параметров. Данные исследования были проведены на задаче с колеблющимся поршнем для разных частот.

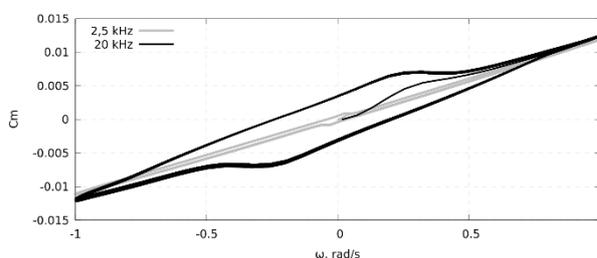


Рис. 1. Зависимость коэффициента момента C_m от угловой скорости ω .

На рисунке 1 показана зависимость коэффициента момента C_m от угловой скорости для различных частот. Зависимость принимает характер гистерезиса, который с увеличением частоты колебаний «расходится».

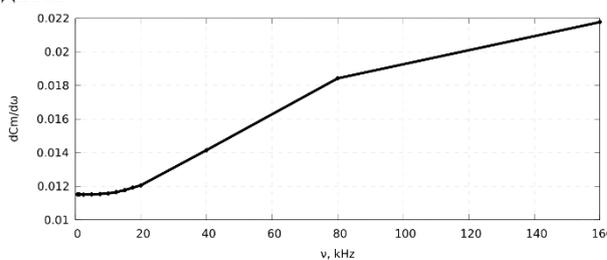


Рис. 2. Зависимость производной C_m от частоты.

На рисунке 2 показана зависимость производной C_m от частоты колебаний стенки. Видно, что на диапазоне частот от 0 до 10 кГц величина производной практически не изменяется. Влияние амплитуды не имеет заметного влияния на демпфирующие моменты.

Список литературы:

1. Shershnev A.A., Kudryavtsev A.N., Kashkovsky A.V., Shoen G.V., Borisov S.P., Shkredov T.Yu., Polevshchikov D.P., Korolev A.A., Khotyanovsky D.V., Kratova Y.V. A numerical code for a wide range of compressible Flows on hybrid computational architectures // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2022. V.9. No.4. P. 85-99. DOI: 0.14529/jsfi220408

УДК 544.277.6

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОСТРУЙНЫХ ИОННО-КЛАСТЕРНЫХ ПУЧКОВ

Коробейщиков Н.Г.

Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Сегодня газоструйные ионно-кластерные пучки (gas cluster ion beam, GCIB) являются перспективными инструментом для обработки поверхности различных материалов с целью улучшения их функциональных характеристик и придания им новых физико-химических свойств. Формирование ионно-кластерного пучка производится в два последовательных этапа: формирование пучка нейтральных кластеров из сверхзвуковой газовой струи, ионизация кластеров электронным ударом, ускорение и формирование пучка кластерных ионов [1, 2].

Основными характеристиками кластерных пучков являются средний размер кластеров N (молек/кластер), плотность тока кластеров J_{clust} (кластер/см²×с), соотношение кластеров и мономеров J_{clust}/I_{mono} (или массовая доля конденсата q). Несмотря на достаточно длительную историю исследований адиабатической конденсации при струйном истечении газов, отсутствует обобщающее описание многих наблюдаемых явлений. Консервативный характер конденсации накладывает существенные ограничения на интенсивность формируемого кластерного пучка.

В данной работе проведено экспериментальное исследование формирования кластерных пучков из сверхзвуковых струй Ag и CO₂, истекающих из конических сопел с различной геометрией. Для диагностики использовался разработанный авторами оригинальный метод, основанный на измерении поперечного профиля массовой интенсивности молекулярного пучка и позволяющий за один цикл измерений определить все основные характеристики кластерного пучка [3].

На основе полученных результатов и анализа результатов других авторов, полученных различными экспериментальными методами, сформулированы обобщенные закономерности формирования кластерных пучков из сверхзвуковых струй разных газов. Для обобщения различных условий истечения использовался параметр подобия конденсации Γ^* , предложенный О.Ф. Хагена [4].

В зависимости от параметра подобия конденсации Γ^* предложены следующие режимы конденсации. При $\Gamma^* < 350$ реализуется начальный режим конденсации, при котором в сверхзвуковой струе формируются малые кластеры со средним размером $N < 10$. Конденсация практически не оказывает влияния на газодинамику истечения, массовая интенсивность молекулярного пучка I_{total} растет линейно с увеличением Γ^* . В диапазоне $350 \lesssim \Gamma^* \lesssim 1500-1800$ в сверхзвуковом потоке развивается массовая конденсация рабочего газа. Средний размер кластеров возрастает до $N \approx 100$, а массовая доля конденсата резко увеличивается до $q \approx 10\%$. Выделение в поток теплоты конденсации приводит к

локальному падению плотности в газовой струе. Это приводит к замедлению роста или даже падению массовой интенсивности молекулярного пучка I_{total} , при этом плотность потока кластеров J_{clust} значительно растет. При $\Gamma^* \gtrsim 1500-1800$ течение переходит на этап развитой конденсации. Массовая доля конденсата стремится к своему предельному значению. На оси струи предельное значение q обычно составляет около 30%. Средний размер кластеров продолжает интенсивно расти. Это приводит к стабилизации и падению плотности потока кластеров J_{clust} и продолжению роста массовой интенсивности кластерного пучка. Таким образом, оптимальные режимы работы осесимметричного газоструйного источника для формирования интенсивных ионно-кластерных пучков лежат в диапазоне $2 \times 10^3 \lesssim \Gamma^* \lesssim 10^4$.

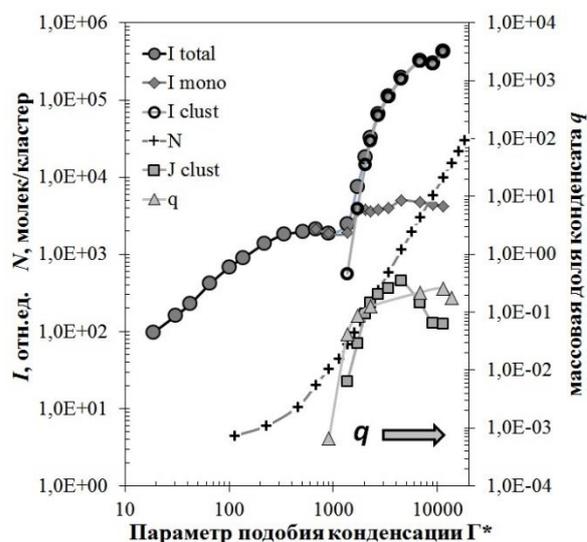


Рис. 1. Основные характеристики кластерного пучка в зависимости от параметра подобия конденсации Γ^* .

Список литературы:

1. Yamada I., Matsuo J., Toyoda N., Aoki T., Seki T. Progress and applications of cluster ion beam technology // Curr. Opin. Solid State Mater. Sci. 2015. V. 19. P. 12–18.
2. Иешкин А.Е., Толстогузов А.Б., Коробейщиков Н.Г., Пеленович В.О., Черныш В.С. Газодинамические источники кластерных ионов для решения фундаментальных и прикладных задач // УФН. 2022. Т.192. №7. С. 563-582.
3. Korobeishchikov N.G., Roenko M.A., Tarantsev G.I. Mean Gas Cluster Size Determination from Cluster Beam Cross-Section // J. Cluster Sci. 2017. V. 28, Is. 5. P. 2529-2547.
4. Hagen O.F. Condensation in Free Jets: Comparison of Rare Gases and Metals // Z. Phys. D - Atoms, Molecules and Clusters. 1987. V. 4. P. 291-299.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №21-19-00046

УДК 536.2

МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАЗРЕЖЕННЫХ НАНОГАЗОВЗВЕСЕЙ

Краснолуцкий С.Л.¹, Лежнев Е.В.^{1,2}, Рудяк В.Я.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

² Институт теплофизики СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1

Наногазовзвеси – это наножидкости, в которых несущей средой является газ. Они могут быть использованы и уже используются в различных промышленных технологических процессах, медицине, а также важны в задачах мониторинга окружающей среды [1,2]. Кроме того, весьма актуальны проблемы описания процессов горения и детонации в наногазовзвесах.

Для моделирования течений наногазовзвесей необходимо знать их коэффициенты переноса, в частности, коэффициент теплопроводности. Экспериментальные методы не очень хорошо подходят для этих целей, поскольку наногазовзвеси, полученные в эксперименте, обычно имеют широкий диапазон распределения дисперсных частиц по размерам, что значительно усложняет интерпретацию экспериментальных данных. Разработанная нами кинетическая теория [3,4] позволяет рассчитывать все коэффициенты переноса в разреженных наногазовзвесах. В частности, к настоящему времени с высокой точностью рассчитаны коэффициенты диффузии, вязкости и термодиффузии. Однако коэффициент теплопроводности до сих пор не рассчитывался.

Альтернативой кинетической теории является метод стохастического молекулярного моделирования (СММ), разработанный в работах [5,6]. Этот метод предназначен, в частности, для расчета коэффициентов переноса в разреженных газах, их смесях и наногазовзвесах не только в бесконечном объеме, но и в каналах различной формы и пористых средах, для которых сложно решить кинетическое уравнение.

Целью данной работы является применение кинетической теории и метода СММ для расчета коэффициента теплопроводности разреженных наногазовзвесей. Рассмотрены наногазовзвеси на основе аргона со сферическими наночастицами цинка при температуре 300 К и атмосферном давлении. Размер наночастиц варьировался от 5 до 20 нм, а их объемная концентрация не превышала 10^{-3} . Взаимодействия молекул несущего газа между собой, молекул несущего газа с наночастицей и наночастиц между собой описаны с помощью потенциалов Леннарда-Джонса, Рудяка–Краснолуцкого [3] и Рудяка–Краснолуцкого–Иванова [7], соответственно.

Результаты моделирования показаны на рис. 1. Здесь сплошная (1), штриховая (2) и пунктирная (3) линии показывают зависимость коэффициента теплопроводности наногазовзвесей, рассчитанного с помощью кинетической теории, от объемной концентрации наночастиц диаметром 5, 10 и 20 нм соответственно. Экспериментальные данные по теплопровод-

ности чистого аргона при тех же давлении и температуре показаны черным прямоугольником [8]. Теплопроводность наногазовзвесей на основе аргона с наночастицами диаметром 5, 10 и 20 нм, рассчитанная методом СММ, показана кружками, треугольниками и ромбами соответственно. Метод СММ согласуется с кинетической теорией с точностью не ниже 3%.

Данные расчетов показывают снижение теплопроводности наногазовзвесей по сравнению с чистым несущим газом. Результаты моделирования качественно соответствуют экспериментальным данным по теплопроводности смесей легких и тяжелых неполярных газов. В докладе приводится объяснение этого факта.

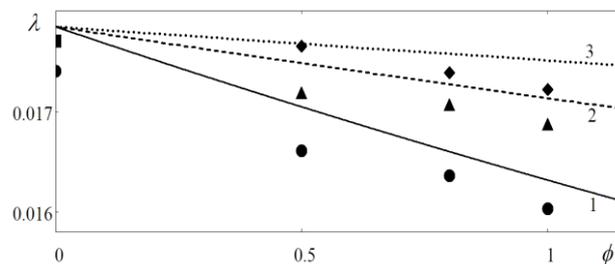


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] наногазовзвесей от объемной концентрации наночастиц ($\phi \cdot 10^3$).

Список литературы:

- Gautam M., Kim J.O., Yong C.S. Fabrication of aerosol-based nanoparticles and their applications in biomedical fields // J. Pharm. Investig. 2021. Vol. 51. P. 361–75.
- Wang C., Friedlander S.K., Mädler L. Nanoparticle aerosol science and technology: an overview // China Particuology. 2005. Vol. 03. No. 05. P. 243–54.
- Рудяк В.Я., Краснолуцкий С.Л. Диффузия наночастиц в разреженном газе // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 7. С. 13–20.
- Рудяк В.Я., Краснолуцкий С.Л. О вязкости разреженных газозвесей с наночастицами // ДАН. 2003. Т. 392. № 4. С. 484–488.
- Rudyak V.Ya., Lezhnev E.V. Stochastic algorithm for simulating gas transport coefficients // J. Comput. Phys. 2018. Vol. 355. P. 95–103.
- Rudyak V.Ya., Lezhnev E.V. Stochastic molecular modeling the transport coefficients of rarefied gas and gas nanosuspensions // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2020. Vol. 11. No. 3. P. 285–93.
- Рудяк В.Я., Краснолуцкий С.Л., Иванов Д.А. О потенциале взаимодействия наночастиц // ДАН. 2012. Т. 442. С. 54–56.
- Thermophysical Properties of Neon, Argon, Krypton, and Xenon (National Standard Reference Data Service of the USSR) / Rabinovich V.A., Vasserman A.A., Nedostup V.I., Veksler L.S.; Ed. Selover T.B. Berlin, Heidelberg: Springer. 1988. 604 p.

Работа выполнена при частичной поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-575)

УДК 533.662

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБЕЧАЙКИ ВИНТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯЧЕЙКИ МУЛЬТИРОТОРНОЙ ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ

Крюков А.В.^{1,2}, Зверков И.Д.^{1,2}, Куликов В.В.¹, Чехов В.П.¹

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская 4/1

² Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Данная работа посвящена разработке доступной методики оценки влияния формы и размеров обечайки на аэродинамические характеристики винта ячейки мультироторной подъемной платформы.

К ним прежде всего относятся различного рода мультикоптеры. Мультироторные платформы в горизонтальном полете существенно проигрывают классическим винтокрылым машинам типа вертолета в аэродинамическом качестве, однако превосходят его в простоте конструкции и управлении. При разработке таких аппаратов решающую роль играет взлетный вес. С увеличением веса и габаритных размеров значительно возрастают требования к конструкции. Для малоразмерных мультироторных платформ допустимо изготовление деталей мультикоптера из пластмассы. С увеличением размеров неизбежно использование в конструкции углепластиковых композитов. Это приводит к стремительному росту стоимости изделия. При использовании таких аппаратов в гордской черте, а также на природе остро встает вопрос защиты лопастей ячеек от внешних повреждений. Кроме того, необходимо обеспечить безопасность людей и животных оградив их от вращающегося винта. В свете вышесказанного при разработке подобных аппаратов необходимо обязательное применение обечайек для винтов.

Таким образом возникает исследовательская задача, направленная на определение механизма оптимизации геометрии защитной обечайки винта мультироторной платформы. С точки зрения динамики полет платформы можно разделить на два режима: вертикальный - летающий кран, при котором горизонтальная скорость много меньше вертикальной. Вторым режимом - транспортировка. В этом режиме аппарат перемещается горизонтально при этом плоскость вращения винтов находится под углом близким к 45° к траектории полета [1]. В этом режиме набегающий поток действует не равномерно на лопасти и зависит от их расположения при вращении.

В рамках данной работы рассматривается способ оценки влияния геометрических параметров обечайки на характеристики ячейки для первого из перечисленных режимов. При этом случае считается что распределение набегающего потока симметрично оси вращения винта, а вертикальная скорость самой ячейки пренебрежимо мала. В предлагаемой методике поток рассматривается как несжимаемый и невязкий. В случае установки трехмерной обечайки добавка тяговой составляющей связана с изменением режима работы самого винта [2] за счет влияния на концевые эффекты лопасти, а также дополнительной подъемной силы за счет разряжения возникающего на поверхности конфузора. В рамках методики предлагается способ

оценки второй составляющей прибавки, которая зависит от самой геометрии обечайки (рис.1). В расчетной методике используются выражения связывающие статическую и динамическую составляющую давления при течениях в струйке тока, а также теория активных дисков для расчета аэродинамических характеристик винтов [3].

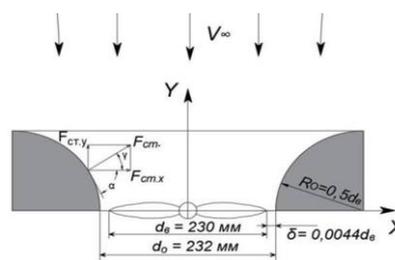


Рис.1 Подъемная сила на поверхности конфузора.

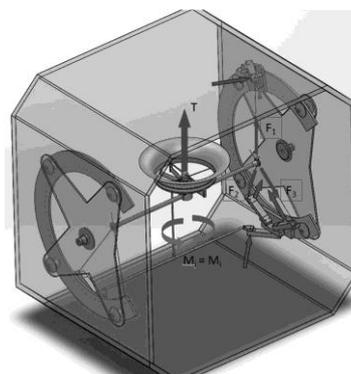


Рис.2 Измерение сил на ячейке в аэродинамической установке АТ-324 ИТПМ.

В результате работы выяснилось, что предложенная методика оценки совместно с учетом изменения работы винта в кольце показала прирост в 20% во время, как в проведенном эксперименте был получен полный прирост 23%.

Список литературы:

- Gillula J.H., Huang H., Vitus M.P., and Tomlin C.J. Design of guaranteed safe maneuvers using reachable sets: Autonomous quadrotor aerobatics in theory and practice. In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 1649–1654, Anchorage, AK, May 2010.
- Остроухов С.П. Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей для летательных аппаратов различного назначения. Москва: Физматлит, 2014.
- Аэродинамика воздушного винта: учеб. пособие / А.Д. Обуховский. 2-е изд. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2016.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ гос. регистрации 121030500149-8)

УДК 533

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С КЕРАМИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Литвинцев А.С.¹, Молчанова А.Н.¹, Погосбекян М.Ю.², Крупнов А.А.², Бондарь Е.А.¹

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

² Научно-исследовательский институт механики Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова, 119192, Россия, Москва, Мичуринский проспект, д. 1

При разработке теплозащиты многоразовых спускаемых аппаратов необходима детальная информация о тепловых нагрузках на её поверхность в различных режимах обтекания. Хорошо известно, что, если в расчетах не учитывать поверхностные химические процессы с участием компонентов высокотемпературной воздушной смеси, то оценки тепловых потоков могут быть занижены в разы. В настоящей работе рассматривается вопрос учета поверхностных химических процессов при движении аппарата в верхних слоях атмосферы (на высоте более 80 км), когда течение невозможно описать на основе сплошнородного подхода в связи с относительно низкой плотностью обтекающего аппарата потока. Основным инструментом численного расчета таких течений является метод прямого статистического моделирования (ПСМ). Для моделирования поверхностных процессов в рамках метода ПСМ требуется информация о вероятностях и временах процессов для конкретных молекул. В [1] был предложен подход для получения такой микроскопической информации на основе детальных макроскопических кинетических механизмов поверхностных процессов. Настоящая работа посвящена использованию данного подхода для реализации в методе ПСМ и программном комплексе SMILE++ недавно разработанного с использованием теории переходного состояния детального макроскопического кинетического механизма, описывающего процессы на поверхности β-кristобалита [2] (жаропрочного керамического материала, типичного для тепловой защиты многоразовых спускаемых аппаратов). Особенностью данного механизма является его полнота и согласованность – в рамках единого квантово-механического подхода получены константы скорости для обширного набора ключевых элементарных стадий поверхностной рекомбинации атомарных компонент воздушной смеси. Учитываемые процессы и коэффициенты, определяющие константы скоростей процессов в аррениусовской форме, представлены в Таблице 1. Отметим, что данный механизм включает реакции, приводящие к возникновению на поверхности оксида азота, роль которых в рассматриваемой задаче пока изучена недостаточно [3].

В докладе будут подробно представлены детали численной реализации данного механизма в методе ПСМ с использованием подхода [1], верификация этой реализации сравнением с макроскопическими решениями для условий термического равновесия и результаты численного исследования влияния поверх-

ностной рекомбинации на аэротермодинамику модельного аппарата в широком диапазоне режимов течения.

Таблица 1. Кинетический механизм [2].

Реакция	A	n	E ₀ , [ккал/моль]	Q, [ккал/моль]
Адсорбция, [см³/моль/с]				
O + (S) → (O – S)	3,015·10 ⁷	1,473	0,07	116,76
O + (O – S) → (O ₂ – S)	4,304·10 ⁷	1,484	0,04	65,70
O + (N – S) → (ON – S)	2,068·10 ⁷	1,421	0,21	110,81
N + (S) → (N – S)	2,352·10 ⁷	1,462	0,10	80,30
N + (O – S) → (NO – S)	7,501·10 ⁷	1,487	0,03	80,11
N + (N – S) → (N ₂ – S)	7,506·10 ⁷	1,489	0,03	149,38
O ₂ + (S) → (O ₂ – S)	9,030·10 ⁷	2,500	0,92	59,20
N ₂ + (S) → (N ₂ – S)	7,731·10 ⁷	2,500	1,06	1,30
NO + (S) → (NO – S)	6,309·10 ⁷	2,500	0,57	42,47
NO + (S) → (ON – S)	4,242·10 ⁷	2,500	1,27	36,71
Десорбция, [1/с]				
(O – S) → O + (S)	1,249·10 ¹⁰	0,034	58,34	-116,76
(O ₂ – S) → O + (O – S)	1,362·10 ¹⁰	0,023	32,82	-65,70
(ON – S) → O + (N – S)	1,249·10 ¹⁰	0,034	55,37	-110,81
(N – S) → N + (S)	1,548·10 ¹⁰	0,024	40,12	-80,30
(NO – S) → N + (O – S)	1,548·10 ¹⁰	0,024	40,03	-80,11
(N ₂ – S) → N + (N – S)	1,413·10 ¹⁰	0,035	74,65	-149,38
(O ₂ – S) → O ₂ + (S)	6,931·10 ⁹	0,021	29,58	-59,20
(N ₂ – S) → N ₂ + (S)	9,303·10 ⁹	0,000	0,65	-1,30
(NO – S) → NO + (S)	7,773·10 ⁹	0,014	21,22	-42,47
(ON – S) → NO + (S)	7,774·10 ⁹	0,014	18,34	-36,71
Рекомбинация Или–Ридела, [см³/моль/с]				
O + (O – S) → O ₂ + (S)	1,657·10 ⁹	0,929	0,33	6,50
O + (O – S) ← O ₂ + (S)	6,955·10 ³	1,945	4,45	-6,50
N + (N – S) → N ₂ + (S)	7,506·10 ⁷	1,489	0,03	148,08
N + (N – S) ← N ₂ + (S)	1,545·10 ²	2,500	75,10	-148,08
N + (O – S) → NO + (S)	2,072·10 ⁷	1,421	0,21	37,64
N + (O – S) ← NO + (S)	1,629·10 ²	2,474	19,41	-37,64
O + (N – S) → NO + (S)	9,051·10 ⁷	1,461	0,06	74,10
O + (N – S) ← NO + (S)	7,98·10 ⁴	2,500	38,32	-74,10
Рекомбинация Ленгмюра–Хиншеллуда, [см²/моль/с]				
2(O – S) → (O ₂ – S) + (S)	3,218·10 ¹⁷	2,887	107,04	-49,81
2(O – S) ← (O ₂ – S) + (S)	2,196·10 ²¹	0,506	58,64	49,81
(O – S) + (N – S) → (NO – S) + (S)	4,165·10 ¹⁶	3,310	78,93	0,76
(O – S) + (N – S) ← (NO – S) + (S)	1,366·10 ¹⁹	1,491	79,03	-0,76

Список литературы:

1. Molchanova A.N., Kashkovsky A.V., Bondar Ye.A. Surface recombination in the direct simulation Monte Carlo method // Physics of Fluids. 2018. Vol. 30, no. 10. P. 107105(18).
2. A.A. Kroupnov, M.Ju. Pogosebekian. Interaction of dissociated air with the surface of β-cristobalite material // Acta Astronautica. 2023. Vol. 203, P. 454(68).
3. Litvintsev A.S., Molchanova A.N., Bondar Ye.A. Effects of heterogeneous NO production on the aerothermodynamics of high-altitude re-entry // AIP Conference Proceedings: XXVII Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter. 2020. V.2288. P.030090(6).

УДК 622.24.063.2:544.77

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛОИДНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИНВЕРТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ И БУРОВЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Лысакова Е.И.¹, Скоробогатова А.Д.¹, Жигарев В.А.¹

¹ Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

Эффективность процесса бурения нефтяных и газовых скважин во многом определяется качеством бурового раствора. Буровой раствор — это сложная система, состоящая из жидкостей, твердых частиц и химических соединений. Основой бурового раствора может быть вода, масло или водно-масляная эмульсия. Растворы на углеводородной основе обладают рядом важных преимуществ: высокой стабильностью во времени; не взаимодействуют с глинами и солями в породе, не загрязняют продуктивные нефтяные горизонты, обладают низкой теплопроводящей способностью, что актуально в вечномёрзлых породах. Также при бурении растворами на углеводородной основе наблюдается меньший износ буровых долот, в отличие от использования буровых растворов на водной основе. Но существует и ряд серьезных недостатков, основным из которых является их высокая токсичность для окружающей среды, что на фоне глобальной озабоченности по поводу защиты окружающей среды от пагубного воздействия химических и не биодegradуемых материалов подталкивает нефтегазовую промышленность к использованию более безопасных и экологически чистых составов.

Базовый буровой раствор на углеводородной основе представляет собой обратную эмульсию типа «вода в масле». Раствор приготавливался с соблюдением временных интервалов и пропорций каждого добавляемого реагента. Подробно методика приготовления буровой эмульсии на углеводородной основе представлена в работе [1].

В первую очередь в данной работе анализировались свойства обратной эмульсии, которая является базой для приготовления промывочных жидкостей. Это было сделано для подбора оптимального соотношения дисперсионной среды и дисперсной фазы бурового раствора на основе растительного технического масла, дальнейшего сравнения его свойств со свойствами стандартного бурового раствора на углеводородной основе.

В работе исследованы следующие соотношения масло/вода для эмульсионного раствора: 50/50, 70/30, 90/10. В качестве дисперсионной среды использовалось техническое рапсовое масло. Для стабилизации эмульсии использовался эмульгатор Aromashka – жидкий эмульгатор растительного происхождения, а дисперсной фазой являлся водный раствор хлорида кальция, т.н. рассол.

Коллоидная устойчивость эмульсий контролировалась с помощью анализатора Turbiscan LAB – прибора, позволяющего проводить анализ долговременной устойчивости образцов, а также при простых механизмах дестабилизации производить расчет среднего размера частиц/капель, их объемной доли, а

также некоторых других параметров. Принцип работы Turbiscan LAB основан на методе многократного рассеяния света (Multiple Light Scattering, MLS).

В ходе исследования было показано, что с течением времени, что при 20 °С, что при 80 °С, расслоение образца не наблюдается, что может говорить о том, что полученные эмульсии являются коллоидно устойчивыми, устойчивость их зависит от соотношения содержания масло/вода. Чем больше масла в эмульсии, тем она менее устойчива. На основании данных об оптимальном соотношении масло-вода, приготавливался базовый буровой раствор. Приготовленный раствор также исследовался на коллоидную устойчивость и сравнивался с показаниями устойчивости базового раствора на основе синтетического масла (низковязкое синтетическое масло «REBASE» РС-230 (ООО «НПО «РЕАСИБ», г. Томск) марки А2), применялось соотношение масло-вода 65-35.

Исследование полученных растворов на коллоидную устойчивость показало, что у раствора на основе синтетического масла индекс дестабилизации больше в 1.5 раза, чем у раствора на основе технического растительного масла. Это свидетельствует о том, что раствор на синтетической основе уступает по своим свойствам раствору на основе технического масла.

Полученные данные могут свидетельствовать о том, что буровой раствор на основе рапсового масла потенциально может быть использован для бурения скважин и позволит значительно снизить экологическую нагрузку в операциях бурения.

Список литературы:

1. Mikhienkova E.I., Lysakov S.V., Neverov A.L., Zhigarev V.A., Minakov A.V. Experimental study on the influence of nanoparticles on oil-based drilling fluid properties. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. V. 208. 109452.
2. Лысакова Е.И., Жигарев В.А., Скоробогатова А.Д., Минаков А.В. Исследование коллоидной устойчивости и реологических свойств инвертной эмульсии с растительным маслом в качестве основы для бурового раствора. // *Журнал сибирского федерального университета. Серия: химия*. 2022. Т.15. №4. С.529-538
3. Токунов, В.И. Технологические жидкости и составы для повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин: Учебное пособие для вузов / В.И. Токунов. – Москва: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. 711 с.
4. Jeswani S.S., Mahesar A A., Memon K R., Tunio A.H. Experimental based investigation for rheological characteristics of vegetable oil base mud. *Engineering science and technology international research journal*. 2018. V.2(3). P. 27-32.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, Красноярского краевой фонда науки № 22-29-20087, <https://rscf.ru/project/22-29-20087/>

УДК 621.9

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СИНТЕЗА НА РАЗМЕР ЗЕРНА ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ ПОСЛЕ ОТЖИГА**Меркулова И.Е., Замчий А.О., Лунев Н.А., Константинов В.О., Баранов Е.А.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Поликристаллический кремний (поликремний) используется для создания устройств хранения данных высокой плотности, тонкопленочных транзисторов и солнечных элементов. Однако, из-за высокой стоимости производства солнечных элементов на основе поликремния, возрастает стоимость получаемой электроэнергии. Метод алюминий-индуцированной кристаллизации (АИК) аморфного кремния позволяет значительно снизить стоимость производства таких элементов, за счет понижения температуры отжига тонкой пленки аморфного кремния и, как следствие, возможности использования в качестве подложек недорогих низкотемпературных материалов, например, стекла [1].

Для светопоглощающих слоев солнечных элементов значительную роль играет размер зерна пленки поликремния: с увеличением размера зерна уменьшается площадь границ зерен, что приводит к уменьшению потерь на границах зерен [2]. Таким образом, увеличение среднего размера кристаллита кремния в настоящее время является актуальной задачей.

Добиться увеличения среднего размера зерна поликремния можно путем увеличения среднего размера зерна поликристаллического алюминия (poly-Al), поскольку образование зародыша зерна и последующий рост поликремния начинается на границах зерен алюминия [3]. Добиться увеличения среднего размера зерна алюминия становится возможным путем варьирования параметров синтеза и отжига образцов.

В данной работе было изучено влияние температуры синтеза на средний размер зерна тонкой пленки поликристаллического алюминия после высокотемпературного отжига.

Тонкие пленки poly-Al ($d = 260$ нм) были синтезированы методом термовакuumного осаждения на подложках монокристаллического кремния с подслоем SiO_2 толщиной 100 нм. Для дальнейшего сравнения, осаждение производилось при двух температурах подложки (80 и 160°C) при скорости синтеза

113 нм/мин. Высокотемпературный отжиг полученных структур производился в вакуумной печи (10^{-5} Па) в течение 15 часов при температурах 400 и 550°C.

Отожженные структуры были исследованы с помощью сканирующей электронной спектроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JSM-6700F, рентгенофазного анализа (РФА) на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 (CoK α -излучение, $2\theta = 20 - 80^\circ$), а также с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) на АСМ-системе NT-MDT Solver Next.

Методом РФА была подтверждена поликристаллическая структура тонких пленок, и был произведен расчет среднего размера кристаллита алюминия с использованием метода определения областей когерентного рассеяния (ОКР). Исследование морфологии поверхности после осаждения и после высокотемпературного отжига и значения среднего размера зерна поликристаллического алюминия производились путем анализа СЭМ-изображений поверхности образцов. Из АСМ-изображений поверхности (2D и 3D) образцов была получены значения среднеквадратичной шероховатости и средний размер зерна.

Список литературы:

1. K. Toko and T. Suemasu, J. Phys. D: Appl. Phys., 53, 373002 (2020). DOI:10.1088/1361-6463/ab91ec
2. R.B. Bergmann, Crystalline Si thin-film solar cells: a review, Applied Physics A: Materials Science & Processing, 69 (1999), 187-194.
3. Nast O., Hartmann A. J. Influence of interface and Al structure on layer exchange during aluminum-induced crystallization of amorphous silicon //Journal of Applied Physics. 2000. Т. 88. №. 2. С. 716-724.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-79-10079,
<https://rscf.ru/project/22-79-10079/> (синтез и отжиг
тонких пленок) и в рамках государственного задания
Института Теплофизики
СО РАН № АААА-А19-119061490008-3
(метод АСМ для диагностики образцов)*

УДК 533

УЧЕТ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ НИЗКОКАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В МЕТОДЕ ПРЯМОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**Молчанова А.Н., Литвинцев А.С., Кашковский А.В., Ващенко П.В., Бондарь Е.А.**Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/10

Поверхность теплозащиты спускаемого аппарата выступает катализатором для экзотермических химических реакций, которые существенно влияют на величину теплового потока к поверхности [1], поэтому такие процессы необходимо учитывать при численном моделировании подобных течений. При моделировании аэротермодинамики спускаемых аппаратов на больших высотах (более 80 км) ввиду сильной разреженности атмосферы нельзя опираться на сплошно-средние подходы. Основным инструментом численного исследования таких течений является метод прямого статистического моделирования (ПСМ) [2]. Таким образом, необходимы модели поверхностных каталитических процессов для метода ПСМ, которые детально учитывают разнообразные поверхностные механизмы [3, 4].

Основные рассматриваемые в работе гетерогенные каталитические процессы, протекающие на поверхности, можно разделить на 2 группы:

1. Поверхностные механизмы, в которых участвуют только адсорбированные на поверхности частицы: реакции десорбции и рекомбинации Ленгмюра-Хиншельвуда.

2. Ударные механизмы, в которых помимо адсорбированных частиц участвуют еще и частицы из газовой фазы, которые сталкиваются с поверхностью: реакции адсорбции, рекомбинации Или-Ридила, диссоциативной адсорбции.

Для моделирования поверхностных процессов в рамках метода ПСМ требуется информация о частотах поверхностных механизмов и вероятностях ударных процессов для конкретных молекул. В [5, 6] был предложен общий подход для получения такой микроскопической информации на основе произвольных детальных многостадийных макроскопических кинетических механизмов поверхностных процессов со скоростями реакций, заданными в форме Аррениуса. Вероятности ударных процессов, зависящие от энергии газофазного реагента и поверхностной плотности поверхностного реагента, получаются из константы скорости рассматриваемого процесса аналитически при помощи применения обратного преобразования Лапласа. Ударные процессы моделируются на этапе перемещения частиц при каждом акте столкновения частицы с поверхностью. Частоты процессов из группы поверхностных механизмов получаются так же из констант скоростей соответствующих процессов, а сами процессы моделируются с использованием схемы мажорантной частоты [7] метода ПСМ на отдельном этапе в конце каждого шага по времени после этапов перемещения и столкновения частиц. В [8] была предложена частотная схема моделирования

всех поверхностных механизмов в совокупности. Разработанный алгоритм был имплементирован в программный пакет SMILE++ [9, 10], предназначенный для многопроцессорных расчетов течений методом ПСМ.

Параллелизация разработанного алгоритма представляет существенные трудности, поскольку для моделирования ударных механизмов требуется мгновенная информация о заселенности поверхности адсорбированными частицами: эта информация хранится на геометрии, с которой работают одновременно несколько процессоров. В [11] был предложен подход к параллелизации разработанного алгоритма поверхностных процессов, основанный на разделении покрытия поверхности адсорбированными частицами между процессорами так, чтобы вычислительные потоки взаимодействовали со своими частями покрытия независимо. Представленный подход позволяет эффективно распараллелить алгоритм описания поверхностных процессов без потери эффективности параллелизации самого метода ПСМ, а также довольно точно описывает поверхностные процессы, что подтверждено серией верифицирующих расчетов, в которой проводились сравнения результатов многопроцессорных расчетов с результатами однопроцессорных расчетов и теоретически полученными значениями.

Разработанные модели успешно применены в трехмерных расчетах высокоэнтальпийных разреженных течений около реальных аппаратов.

Список литературы:

1. Ковалев В.Л. Гетерогенные каталитические процессы в аэротермодинамике. 2002.
2. Bird. G.A. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. 1994.
3. Choquet I. Phys. Fluids, 1999, Vol.11, No 6, pp.1650-1661.
4. Ребров А.К. Успехи физических наук, 2017, Т.187, №2, сс.193–200.
5. Molchanova A.N., Kashkovsky A.V., Bondar Ye.A. Physics of Fluids. Vol. 30, No. 10, 2018. P. 107105(18).
6. Litvintsev A.S., Molchanova A.N., Bondar Ye.A. Journal of Physics: Conference Series: XVI All-Russian Seminar with international participation Dynamics of Multiphase Media. Vol. 1404. 2019. P. 012118(6).
7. Ivanov M.S., Rogasinsky S.V. Soviet Journal of Numerical and Analytical Mathematical Modeling. Vol. 3, no. 6. 1988. P. 453(65).
8. Litvintsev A.S., Molchanova A.N., Bondar Ye.A. AIP Conference Proceedings: XXVII Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter. Vol. 2288. 2020. P. 030090(6).
9. Kashkovsky A.V., Bondar Ye.A., Zhukova G.A. et al. 24th Int. Symp. on RGD. 2005. P.583(8).
10. Ivanov M.S., Kashkovsky A.V., Vashchenkov P.V., Bondar Ye.A. 27th Int. Symp. on RGD. AIP Conf. Proceedings. 2011. 1333. P.211(8).
11. Литвинцев А.С., Молчанова А.Н., Кашковский А.В., Бондарь Е.А. Теплофизика и физическая гидродинамика: VI Всерос. науч. конф. с элементами шк. молодых учёных. 2021. Т.8. С.189.

УДК 536.2 (075)

ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНАЯ ДВУХТЕМПЕРАТУРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА В ПЛАЗМЕ

Пашин А.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»,
443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Известно, что в газовой-электронной плазме наблюдаются большие разности температур между электронным газом и газом, включающим положительно заряженные ионы и нейтральные частицы (молекулы, атомы). Происхождение этой разности можно установить, если принять следующие допущения:

1. Время установления равновесия в электронном газе и в газе из тяжелых частиц значительно меньше времени установления равновесия между двумя этими газами. В этом случае состояние плазмы в неустановившихся процессах может быть описано двумя температурами – для электронов и тяжелых частиц с конечной разностью температур в каждой макроскопической точке плазмы. Очевидно, что двухтемпературная модель теплообмена в плазме будет состоятельна лишь в случае, если рассматриваются такие процессы, для которых время наступления стационарного режима значительно превышает время установления равновесия в каждом из отдельных газов.

2. Считаем, что выравнивание температур в каждой макроскопической точке плазмы происходит путем теплопроводности, называемой, в отличие от известной теплопроводности, теплопроводность в точке. Так же полагаем, что поток тепла в единице объема пропорционален разности температур [1-3].

Математическая безразмерная модель, которая описывает вышеперечисленные процессы с учетом линейной релаксации, принимает следующий вид:

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial Fo} + F_1 \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Fo^2} = \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial \xi^2} + F_2 \frac{\partial^3 \Theta_1}{\partial \xi^2 \partial Fo} + Bi F_1 \frac{\partial}{\partial Fo} (\Theta_2 - \Theta_1) + Bi (\Theta_2 - \Theta_1) + Q_1 [\sin^2(\omega_1 Fo) + \tau_1 \omega \sin(2\omega_1 Fo)], \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial Fo} = c Bi (\Theta_1 - \Theta_2), \quad (2)$$

$$\Theta_1(\xi, 0) = \Theta_2(\xi, 0) = 1 - \frac{T_{cp}}{T_0}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Theta_1(\xi, 0)}{\partial Fo} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Theta_1(0, Fo)}{\partial \xi} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Theta_1(1, Fo)}{\partial \xi} + Bi_1 \Theta_1(1, Fo) = 0, \quad (6)$$

где безразмерные величины: $\Theta_1 = \frac{T_1 - T_{cp}}{T_0}$ - температура электронов;

$\Theta_2 = \frac{T_2 - T_{cp}}{T_0}$ - температура молекул

и ионов; $\xi = \frac{x}{\delta}$ - безразмерная координата; $Fo = \frac{\lambda_1 t}{\delta^2 c_1}$ -

безразмерное время, причем $Fo > 0, 0 < \xi < 1$;

$F_1 = \frac{\lambda_1 \tau_1}{\delta^2 c_1}, F_2 = \frac{\lambda_1 \tau_2}{\delta^2 c_1}$ - коэффициенты релаксации;

$Bi = \frac{\alpha \delta^2}{c_1}$ - объемный критерий Био; $Bi_1 = \frac{\alpha_1 \delta}{\lambda_1}$ - критерий Био;

$Q_1 = \frac{j_0^2 \delta^2}{\sigma c_1 \alpha_1 T_0}, c = \frac{c_1}{c_2}, \omega_1 = \frac{\omega c_1 \delta^2}{\lambda_1}$ - безразмерные комплексы;

размерные величины: T_1, T_2, T_{cp}, T_0 - соответственно температуры электронов, тяжелых частиц, среды, ограничивающей плазму, начальная, K ;

δ - размер области нахождения плазмы, m ; λ_1 - коэффициент теплопроводности электронов, $Вт \cdot м^{-1} \cdot K^{-1}$;

c_1, c_2 - объемные теплоемкости электронов и массивных частиц, $Дж \cdot м^{-3} \cdot K^{-1}$;

τ_1, τ_2 - времена релаксации температуры и теплового потока соответственно, c ; α - коэффициент объемной теплоотдачи, $Вт \cdot м^{-3} \cdot K^{-1}$;

α_1 - коэффициент теплоотдачи между плазмой и окружающей средой, $Вт \cdot м^{-2} \cdot K^{-1}$;

σ - коэффициент электропроводности плазмы, $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$;

j_0 - амплитуда плотности тока, $А \cdot м^{-2}$;

ω - циклическая частота переменного тока, c^{-1} .

Решение системы уравнений (1), (2) с начальными условиями (3), (4) и граничными условиями (5), (6) осуществлялось численным методом по 9-ти точечному шаблону на равномерной конечно-разностной сетке с порядком аппроксимации $O(h_{Fo} + h_{\xi}^2)$.

Учитывая, что теплообмен между электронами и массивными частицами плазмы при прочих равных условиях полностью определяется величиной объемного коэффициента теплоотдачи Bi , было проведено детальное исследование его влияния на температуры Θ_2 и Θ_1 .

Учитывая, что теплообмен между электронами и массивными частицами плазмы при прочих равных условиях полностью определяется величиной объемного коэффициента теплоотдачи Bi , было проведено детальное исследование его влияния на температуры Θ_2 и Θ_1 .

Учитывая, что теплообмен между электронами и массивными частицами плазмы при прочих равных условиях полностью определяется величиной объемного коэффициента теплоотдачи Bi , было проведено детальное исследование его влияния на температуры Θ_2 и Θ_1 .

Учитывая, что теплообмен между электронами и массивными частицами плазмы при прочих равных условиях полностью определяется величиной объемного коэффициента теплоотдачи Bi , было проведено детальное исследование его влияния на температуры Θ_2 и Θ_1 .

Учитывая, что теплообмен между электронами и массивными частицами плазмы при прочих равных условиях полностью определяется величиной объемного коэффициента теплоотдачи Bi , было проведено детальное исследование его влияния на температуры Θ_2 и Θ_1 .

Учитывая, что теплообмен между электронами и массивными частицами плазмы при прочих равных условиях полностью определяется величиной объемного коэффициента теплоотдачи Bi , было проведено детальное исследование его влияния на температуры Θ_2 и Θ_1 .

Учитывая, что теплообмен между электронами и массивными частицами плазмы при прочих равных условиях полностью определяется величиной объемного коэффициента теплоотдачи Bi , было проведено детальное исследование его влияния на температуры Θ_2 и Θ_1 .

Список литературы:

1. Теория вибрационных свойств электронного газа и ее свойств / А.А. Власов. М.: Ленанд, 2017. 232 с.
2. Собрание трудов. В 2 т. Т. 1. / Л.Д. Ландау; Под ред. Е.М. Лифшица. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
3. Соболев С.Л. Локально-неравновесные модели процессов переноса // УФН. 1997. Т.167. №10. С. 1095-1106.

УДК 533

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ

Перепечко Л.Н., Тимошенко Н.И., Тихонович В.В., Шарина И.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Принимая во внимание то, что Всероссийская конференция «XXXIX Сибирский теплофизический семинар» посвящена 90-летию академика РАН А.К.Реброва, необходимо отметить, что Алексей Кузьмич является основателем нескольких научно-технических направлений исследований в институте теплофизики СО РАН, имеющих практическую реализацию.

Это пароструйные вакуумные насосы, защищенные 12 патентами РФ. Также можно отметить товарный знак «Зырянка» - единственный товарный знак, помимо логотипа института, зарегистрированный за всю историю ИТ СО РАН. Технологии вакуумного разделения нефтяных смесей и моторных масел защищены 3 патентами. В десятилетия 21 века одним из первых в стране А.К.Ребров занялся исследованием свойств наноматериалов - газоструйным нанесением наноразмерных металлополимерных покрытий. Но самые новые достижения юбиляра, которые также защищены патентами РФ, находятся в области нанесения алмазных покрытий.

Достоинством алмаза является химическая инертность, высокая теплопроводность, прозрачность в широком диапазоне спектра, хорошие диэлектрические свойства. Полупроводниковый алмаз рассматривается как перспективный материал для силовой и микроэлектроники [1]. Высокая твердость и теплопроводность, износостойкость и химическая инертность являются ключевыми свойствами материалов на основе алмаза [2, 3], поэтому пленки и композиты из поликристаллического алмаза (PCD) могут быть использованы в теплоотводах, твердых покрытиях для режущих инструментов и для нанесения защитного слоя.

Преимуществом изобретений Реброва А.К. является создание устройства и способа газоструйного способа осаждения алмазных пленок, обеспечивающего высокую скорость осаждения и высокое качество алмазных пленок [4 - 6]. Данная схема позволяет проводить начальную обработку поверхности атомарным водородом (создавать центры нуклеации) и сразу же проводить осаждение без выноса подложки в атмосферу и взаимодействия обработанной поверхности с нежелательными компонентами. Для этого вначале подают только водород (без углеродсодержащего газа), активируют его СВЧ разрядом и обрабатывают поверхность подложки атомарным водородом, который химически активный и имеет высокую температуру.

Устройство позволяет достигнуть скорости осаждения до 100мкм/ч и получать высококачественные алмазные покрытия с нано- и микроразмерами кристаллов. Качество полученных алмазных покрытий позволяет их использовать в качестве теплопроводной

электроизолирующей основы для размещения микроэлектронных устройств с целью интенсификации их охлаждения.

Анализ имеющихся литературных и патентных данных позволяет сделать заключение, что основные направления применения поликристаллических алмазных покрытий в мире связаны в первую очередь с электронными компонентами, использованием в оптических устройствах, в т.ч. лазерах, с производством инструмента и защитных покрытий. Данная направленность исследований (по информации из базы данных Questel <https://www.orbit.com/>) интенсивно развивается: количество ежегодных публикаций и выданных патентов превышает более чем в два раза эти же цифры десятилетней давности, более трети всех патентоспособных решений принадлежит Китаю, США находятся на втором месте (15%), Япония и ЕС имеют по семь процентов на настоящий момент. По фирмам в области поликристаллических алмазных покрытий наибольшим количеством патентов, защищенных в том числе и в нескольких странах, обладают Smith international, Sumitomo electronic industries, Element six.

В России, например, в 2023 году компания «Алком» (Уфа) начала выпускать первые отечественные поликристаллические алмазные резцы с улучшенными характеристиками для бурения скважин со сложными геологическими условиями, до сих пор такие резцы импортировали:

<https://expert.ru/expert/2023/19/importozamescheniy-e-reztsy-dlya-bureniya-skvazhin/>.

Список литературы:

1. Chaoqun Dang, Anliang Lu, Heyi Wang, Hongti Zhang and Yang Lu. Diamond semiconductor and elastic strain engineering. *Journal of Semiconductors*, 2022, 43, 021801 [doi: 10.1088/1674-4926/43/2/021801].
2. H. Liu and D. S. Dandy. Studies on nucleation process in diamond CVD: an overview of recent developments. *Diamond Relat. Mater* Volume 4, Issue 10, 1995, Pages 1173-1188 [https://doi.org/10.1016/0925-9635\(96\)00297-2](https://doi.org/10.1016/0925-9635(96)00297-2).
3. Artem Martyanov, Ivan Tiazhelov, Sergey Savin, Valery Voronov, Vitaly Konov and Vadim Sedov Synthesis of Polycrystalline Diamond Films in Microwave Plasma at Ultrahigh Concentrations of Methane. *Coatings* 2023, 13, 751. <https://doi.org/10.3390/coatings13040751>.
4. Rebrov A.K., Bobrov M.S., Emelyanov A.A. et al. Experience in the synthesis of diamond from a supersonic microwave plasma jet// *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2019. V.7(2) P.131-137. DOI:10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2019031315.
5. Ребров А.К., Емельянов А.А., Плотников М.Ю. и др. Синтез алмаза из высокоскоростного потока СВЧ-плазмы // Докл. АН. Техн. науки, 2020. Т.490, № 1. с.48-51. DOI: 10.31857/S2686740020010198.
6. Emelyanov A.A., Pinaev V.A., Plotnikov M.Yu. et al. Effect of methane flow rate on gas-jet MPCVD diamond synthesis// *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2022, V. 55(20), 205202. DOI 10.1088/1361-6463/ac526e

УДК 533.17: 541.64

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕДИ ОБРАБОТКОЙ ПЛАЗМОЙ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Петрова А.В.^{1,2}, Сафонов А.И.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Свойства материала во многом определяются морфологией и составом его приповерхностных слоёв. Создание микро- и наноструктур на поверхности материала является одним из путей, который позволяет придавать материалам различные функциональные свойства, порой даже уникальные. Одним из простых и эффективных методов воздействия на поверхность является её обработка плазмой тлеющего разряда. В результате обработки на поверхности и в её внешних слоях происходят процессы нагревания, распыления, окисления и др., что приводит к её структурированию и/или к изменению ее химического состава.

В работе исследовалась возможность влияния обработки воздушной плазмой тлеющего разряда на структурирование поверхности меди. Изучалось влияние различных параметров (давления газа в процессе обработки, плотности тока, времени обработки) на морфологию, состав и поверхностные свойства смачивания. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, разработанной и собранной для данного исследования. Медный образец в виде диска диаметром 20 и толщиной 2 мм размещался на катоде в вакуумной камере. После предварительной откачки в камеру через регуляторы расхода подаётся рабочий газ (воздух), устанавливаются заданные параметры и производится обработка поверхности образца плазмой тлеющего разряда.

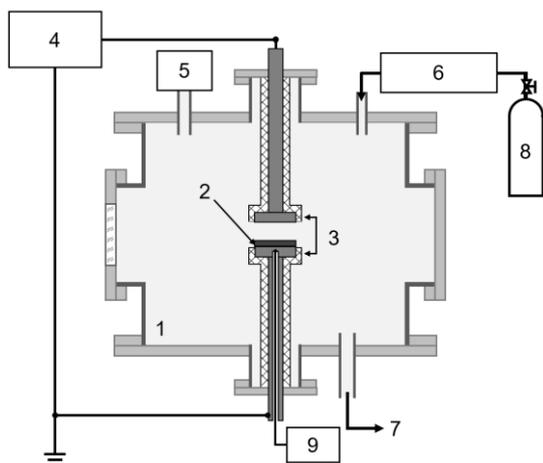


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – вакуумная камера, 2 – образец, 3 – электроды, 4 – источник постоянного тока, 5 – вакуумметр, 6 – расходомер, 7 – вакуумный насос, 8 – подача воздуха, 9 – измерение температуры образца.

После обработки поверхность образца была изучена методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, EDX), шероховатость поверхности была измерена с помощью наноиндентирования, также были проведены измерения статического угла смачивания. Результат обработки плазмой тлеющего разряда представлен на рис. 2. Для сравнения приведена морфология образца до и после обработки. На поверхности образца наблюдается изменение морфологии в виде появления микро- и наноструктур.

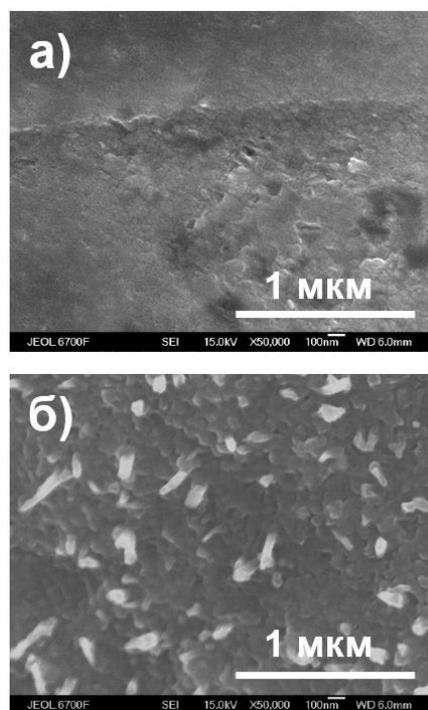


Рис. 2. Морфология поверхности образца: (а) исходный образец; (б) образец после обработки плазмой тлеющего разряда

В результате проделанной работы было показано, что при обработке поверхности меди плазмой тлеющего разряда наблюдается различная стадия процесса окисления поверхности. Степень воздействия этого процесса на структуру, состав и свойства поверхности зависит от параметров тлеющего разряда.

Работа выполнена при поддержке государственного гранта ИТ СО РАН

УДК 629.78

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ****Попов Г.А., Петухов В.Г.**Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики МАИ,
125080, Россия, Москва, Ленинградское ш., 5, а/я 43

Современные космические транспортные операции часто требуют больших затрат характеристической скорости, что приводит к необходимости использования электрических ракетных двигателей (ЭРД) с высоким значением удельного импульса тяги для уменьшения затрат рабочего тела и увеличения массы космических аппаратов (КА) на целевых орбитах. Во многих случаях применение ЭРД является относительно дешевой альтернативой разработке и использованию дорогостоящих средств выведения (ракет-носителей и разгонных блоков) тяжелого и сверхтяжелого классов. Увеличение массы КА на целевых орбитах при использовании ЭРД обычно достигается ценой увеличения длительности выведения. Использование комбинированных схем выведения, заключающихся в последовательном применении традиционных ракетных двигателей большой тяги и ЭРД позволяет достигать компромисса между требованиями увеличения выводимой массы КА и уменьшения длительности перелета. В настоящее время ЭРД применяются для довыведения КА на геостационарную и другие целевые орбиты в США, Европе и России и для формирования траекторий межпланетных КА в США, Европе и Японии.

Характерной особенностью ЭРД является малая величина тяги, ограниченная доступной для обеспечения их работы электрической мощностью. В связи с этим требуемая длительность участков работы ЭРД на типичных траекториях сравнима с длительностью перелета. Задача повышения эффективности космических транспортных операций требует вычисления оптимальных программ управления на траекториях перелета КА с ЭРД. Другой важной причиной необходимости оптимизации траектории является обеспечение достоверности оценок влияния вариации основных проектных параметров КА с ЭРД и средств его выведения на показатели эффективности в процессе проектирования космической миссии. Действительно, если при проведении проектно-баллистического анализа используются неоптимальные решения, то разница в показателях качества различных вариантов миссий может быть вызвана не различием в значениях их проектных параметров, а разной степенью неоптимальности траекторий сравниваемых вариантов.

Типичными критериями оптимизации являются минимизация массы рабочего тела ЭРД или времени перелета, однако возможны и другие критерии, такие как максимизация массы полезной нагрузки КА, минимизация поглощенной дозы радиации или достижение экстремальных значений каких-либо траекторных или проектных параметров.

Многообразие задач оптимизации траекторий КА с ЭРДУ определяется многообразием типов перелетов

(многовитковые межорбитальные перелеты, межпланетные перелеты, перелеты к Луне и естественным спутникам других планет), возможным наличием областей движения с разным составом внешних возмущений, наличием разнообразных ограничений на управление вектором тяги, разным уровнем отношения управляющего воздействия (реактивной тяги ЭРД) к внешним силам, разными возможностями регулирования мощности, тяги и удельного импульса ЭРД. Применение различных математических моделей движения на разных участках движения КА, комбинаций двигательных установок большой и малой тяги, необходимость проектирования траекторий со сложными маршрутами (например, траекторий с гравитационными маневрами, с пролетом или сопровождением нескольких астероидов, замкнутых межпланетных траекторий для доставки на Землю образцов грунта небесных тел и других) приводит к необходимости сквозной оптимизации траекторий КА с ЭРД. Существование множества локальных экстремумов задачи оптимизации приводит к необходимости рассмотрения задач глобальной оптимизации. В процессе проектно-баллистического анализа обычно требуется проведение совместной оптимизации траектории КА с ЭРД и основных проектных параметров КА и средств его выведения. Безусловно, требуется параметрический анализ оптимальных решений для оценки влияния дат старта, длительности перелета и основных проектных параметров на характеристики космической миссии. В ряде случаев, для обеспечения автономности функционирования КА с ЭРДУ, требуется синтез оптимального или близкого к оптимальному управления с обратной связью.

Многолетние исследования, проводимые в Московском авиационном институте (МАИ) и Научно-исследовательском институте прикладной механики и электродинамики МАИ позволили создать эффективные методы расчета и оптимизации траекторий КА с ЭРД и разработать новые схемы выведения КА с ЭРД на высокие рабочие орбиты.

Разработанные нами совместно с АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева» комбинированные схемы выведения уже применялись для доставки на геостационарную орбиту (ГСО) шести КА и позволили увеличить доставляемую на ГСО массу КА на 25%.

Показана возможность увеличения доставляемой на ГСО массы КА в 1.5-3 раза, в зависимости от типа используемых средств выведения и ограничений на длительность перелета и электрическую мощность, доступную для ЭРД. При использовании группового выведения нескольких КА, применение ЭРД обеспечивает существенное (в 1.5-2 раза) снижение стоимости выведения на высокие целевые орбиты.

УДК 532.529

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНОГО ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА ИЗ СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА В ВАКУУМ И ФОНОВЫЙ ГАЗ**Приходько В.Г., Ярыгин В.Н., Ярыгин И.В.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследование струйного истечения газа совместно с потоком капель из сопел в вакуум и фоновый газ является актуальной задачей ввиду широкого распространения газочапельных потоков в тепло- и массообменных аппаратах и устройствах. Это связано, в первую очередь, с повышением эффективности охлаждения теплонапряженных конструкций за счет использования теплоты фазового перехода при испарении капель при даже небольшом добавлении капельной фазы в охлаждающий поток. Можно выделить два основных способа получения газочапельного потока внутри сопла. В первом, назовем его объемным, газочапельный поток получают путем распыления жидкости, например, с помощью форсунок внутри сопла и дальнейшего смешения капель с несущим газовым потоком, при этом основная масса жидкости попадает в поток газа, и только незначительная часть – на стенку сопла или устройства. Во втором способе, назовем его пленочным, газочапельный поток формируется при взаимодействии спутного газового потока с пристенной пленкой жидкости как внутри сопла, так и при распаде пленки жидкости на выходной кромке сопла.

Ранее в ИТ СО РАН был выполнен цикл экспериментальных исследований, направленных на изучение пристенного пленочного течения внутри сопла и в струе за ним применительно к решению проблемы внешнего загрязнения Международной космической станции струями двигателей ориентации [1]. В данной работе исследуется структура течения капельной фазы в газочапельном потоке за срезом сверхзвукового сопла с геометрическим числом Маха $M = 3$ и диаметром критического сечения 10 мм как при пленочном, так и при объемном способе подачи жидкости. При пленочном способе жидкость подавалась на стенку в дозвуковой части сопла и двигалась за счет касательного напряжения со стороны спутного газового потока. При объемном способе жидкость подавалась через капилляр диаметром 1 мм на оси сопла, после чего дробилась на мелкие капли спутным потоком газа. При этом капилляр мог перемещаться вдоль оси сопла, позволяя осуществлять подачу жидкости как в дозвуковую, так и в сверхзвуковую часть сопла.

Как показали проведенные эксперименты, при пленочном способе подачи жидкости за срезом сопла возникает пространственная структура течения капельной фазы, состоящая из двух характерных областей: центральной и периферийной. При этом центральная область течения капельной фазы формируется за счет срыва капель с поверхности пленки при течении внутри сопла, а периферийная – при распаде пристенной пленки на выходной кромке сопла. При объемном способе подачи жидкости в сверхзвуковое сопло возникающая структура течения за сверхзвуко-

вым соплом зависит от места подачи жидкости (положения капилляра внутри сопла) и режима течения в недорасширенной струе за соплом. Что касается режимов течения в недорасширенной струе за соплом, то в качестве определяющего может быть принято число $Re_L = Re_* / \sqrt{N}$, позволяющее классифицировать течение по видам от сплошного с наличием сверхзвукового ядра струи, боковых и замыкающего скачков уплотнения до режима рассеяния с исчезновением ударно-волновой структуры (здесь Re_* - число Рейнольдса, определяемое по параметрам в критическом сечении сопла, $N = p_0/p_\infty$ - перепад давлений между форкамерой сопла и вакуумной камерой). Если режим течения внутри сопла полностью определяется заданием или выбором числа Рейнольдса Re_* , то режим течения в струе за соплом при истечении газа в вакуум зависит при заданном Re_* еще и от величины давления в окружающем пространстве, или, более точно, от нерасчетности истечения. На рис. 1 для примера представлены данные по визуализации структуры течения капельной фазы за сверхзвуковым соплом при подаче жидкости через капилляр в сверхзвуковую часть сопла для режима истечения с числом Рейнольдса $Re_L = 2,8 \cdot 10^4$, что соответствует турбулентному режиму течения в слое смешения. С помощью методики спектрофотометрирования [2] получены количественные данные по угловому распределению капельной фазы за срезом сопла и показано влияние параметров газового потока, положения капилляра и давления в окружающем пространстве на структуру течения капельной фазы.

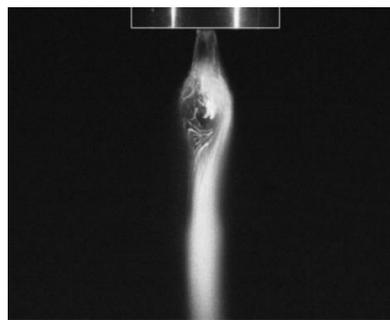


Рис. 1. Истечение струи жидкости, инжектируемой в сверхзвуковой спутный газовый поток, в вакуумную камеру с подсветкой по методу «лазерного ножа».

Список литературы:

1. Yarygin V.N., Prikhodko V.G., Yarygin I.V., Vyazov Y.N. Near-wall liquid film interaction with co-current gas flow inside nozzle and under outflow into vacuum // Vacuum. 2019. Vol.159. P.494-499.
2. Prikhodko V.G., Yarygin I.V., Vyazov Yu.N. Spectrophotometry technique for droplet phase spatial distribution measurements in gas-droplet flow behind a supersonic nozzle in a vacuum // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2019. Vol.7, Iss.2. P.105-111.

УДК 533.7

**РЕНОРМАЛИЗОВАННОЕ ДВУХЧАСТИЧНОЕ КИНЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ БОЛЬЦМАНА
ДЛЯ ПАР КВАЗИЧАСТИЦ И ЕГО СВОЙСТВА****Савельев В.Л.^{1,2}**¹ Астрофизический Институт им. В. Г. Фесенкова,
050020, Республика Казахстан, Алматы, Обсерватория, 23² Институт ионосферы,
050020, Республика Казахстан, Алматы, Каменское плато,
Садоводческое товарищество «Ионосфера», 117

Основным процессом взаимодействия в больцмановской модели реальных газов являются бинарные столкновения молекул. Для статистического описания газовой системы необходимо знание двухчастичной функции распределения, чтобы учесть это взаимодействие. Как известно, Людвиг Больцман в интеграле столкновений представил ее через произведение двух одночастичных функций и написал свое знаменитое кинетическое уравнение для одночастичной функции распределения. В [1] с использованием тех же физических приближений, что и у Людвигу Больцмана, было предложено кинетическое уравнение для двухчастичных функций распределения в газовой смеси, а затем мы проанализировали его свойства в [2]. Правая часть этого уравнения содержит произведение линейного оператора рассеяния и хаос проектора. Классическое уравнение Больцмана следует из этого уравнения без каких-либо дополнительных приближений после простого интегрирования по скоростям и положениям второй частицы. Все, что можно получить из уравнения Больцмана, можно получить и из этого двухчастичного кинетического уравнения. Подчеркнем еще раз, что это уравнение не выводится из первых принципов (как это пытались сделать, например, в иерархии ББГКИ), и мы не решаем строго концептуальных задач статистической физики: двухчастичное кинетическое уравнение записывается в рамках эвристических допущений Больцмана, которые чрезвычайно хороши.

Поскольку оператор рассеяния проще интеграла столкновений, двухчастичное уравнение открывает новые пути математического описания динамики «больцмановского газа». В частности, используя дивергентную форму оператора рассеяния, это уравнение можно представить в виде уравнения Лиувилля, из которого следует, что реальные молекулы можно заменить квазичастицами, функция распределения которых совпадает с функцией распределения реальных молекул, но динамика у них совсем другая. Квазичастицы не сталкиваются, как настоящие молекулы, а движутся по непрерывным траекториям в фазовом

пространстве. Эффект столкновений учитывается взаимодействием пар квазичастиц с самосогласованным «магнитоподобным силовым полем». Пары квазичастиц медленно вращаются с угловой скоростью, зависящей от функции распределения. Использование пар квазичастиц для моделирования течений газа [3], в частности, полезно, поскольку энергия в системе пар квазичастиц сохраняется автоматически.

В докладе мы приводим факторизацию столкновительного члена в двухчастичном кинетическом уравнении на более простые оператор рассеяния и хаос проектор. Преобразуем оператор рассеяния в дивергентную форму и приводим его модельные формы. Делаем вывод расчетного алгоритма непосредственно из кинетического уравнения, который сводится к последовательному медленному вращению пар квазичастиц. Приводим явное приближенное выражение для угловой скорости вращения пар квазичастиц через несколько первых моментов функции распределения, используя специальное ковариантное разложение Грэда для функции распределения, которое сводится к точному решению Бобылева-Крука-Ву в изотропном случае. Мы также представляем численное моделирование релаксации функций распределения к равновесию на основе этого уравнения и анализируем сравнение с существующими точными результатами.

Можно сделать вывод, что описанный алгоритм будет эффективен для моделирования в кинетическом режиме газовой динамики в областях течения с малыми числами Кнудсена, где стандартные модели DSMC сталкиваются со значительными трудностями.

Список литературы:

1. V.L. Saveliev, Quasiparticle pairs in kinetic theory. AIP Conference Proceedings. 2016. Т. 1786. 040012. <https://doi.org/10.1063/1.4967550>
2. Saveliev V.L., Two-particle kinetic equation: method and exact solution// Analysis and Mathematical Physics. 2021. Т. 11, № 98. <https://doi.org/10.1007/s13324-021-00531-2>.
3. Saveliev V.L. Model two-particle kinetic equation for pairs of quasiparticles// Phys. Fluids. 2022. Т. 34. 097118. <https://doi.org/10.1063/5.0106154>.

УДК 621.9

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ОБЪЁМНОГО ЗАРЯДА ПЛАЗМЫ
ВБЛИЗИ ЦЕПОЧЕК ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ, ЛЕВИТИРУЮЩИХ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ**

Сальников М.В.¹, Федосеев А.В.², Сухинин Г.И.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
² Объединённый институт высоких температур,
125412, город Москва, Ижорская ул., д.13 стр.2

Пылевые частицы, попадая в газоразрядную плазму, заряжаются до больших значений отрицательного заряда. Вокруг них накапливаются облака ионов, которые, при возникновении в системе анизотропии, искажаются, порождая эффект, именуемый ионной фокусировкой. Ионная фокусировка способствует образованию в системе «ионное облако-пылевая частица» осцилляций в плазме и дипольного момента. В системе из нескольких пылевых частиц названные эффекты приводят к явлению самоорганизации – появлению в газоразрядной пылевой плазме структур, напоминающих кристаллы. Самый простой тип пылевых структур – пылевая цепочка [1].

При совместном моделировании движения пылевых частиц и ионов возникает проблема в том, что их массы оказываются несопоставимыми. Прямое моделирование движения в данном случае окажется безрезультатным на текущем уровне развития технологий. Существует лишь модель, основанная на принципах молекулярной динамики DRIAD [2], которая приближённо рассчитывает движения ионов, нормируя их массу и заряд в сотни раз. Однако такой подход крайне негативно сказывается на расчёте заряда пылевой частицы и пространственного распределения объёмного заряда.

Основываясь на ранее представленной модели [3], в которой траектории ионов считались из приближения среднего поля, была разработана её модификация, в которой поочерёдно рассчитываются траектории ионов и пылевых частиц. Траектории движения пылевых частиц определяются согласно уравнению движения:

$$F_k = F_{q,k} + F_{n,k} + F_g + F_{E,k} + F_{fr,k}$$

$$F_{q,k} = \sum_{j \neq k} Q_k Q_j \frac{z_k - z_j}{r^3}$$

$$F_{n,k} = -Q_k \left. \frac{\partial U(\rho, z)}{\partial z} \right|_{z=z_k, \rho=0}$$

$$F_{E,k} = \begin{cases} Q_k (E_m + E_k z), z > 0 \\ Q_k E_m, z < 0 \end{cases}$$

$$F_{fr,k} = \gamma \dot{z}_k$$

где $F_{q,k}$ – сила кулоновского взаимодействия F_n – сила, действующая на пылевые частицы согласно пространственному распределению ионов, $F_{E,k}$ – внешняя

электростатическая сила, действующая на пылевые частицы, F_g – сила гравитации, $F_{fr,k}$ – сила трения.

В результате самосогласованного расчёта данной моделью изучена зависимость сил, действующих на пылевые частицы со стороны объёмного заряда плазмы, от величины внешнего электростатического поля. Данная зависимость представлена на Рисунке 1.

Из данного графика видно, что сила действия объёмного заряда на первую и вторую пылевые частицы цепочки быстро выходит на уровень насыщения, в то время как величина этой силы линейно растёт для последней частицы в цепочке.

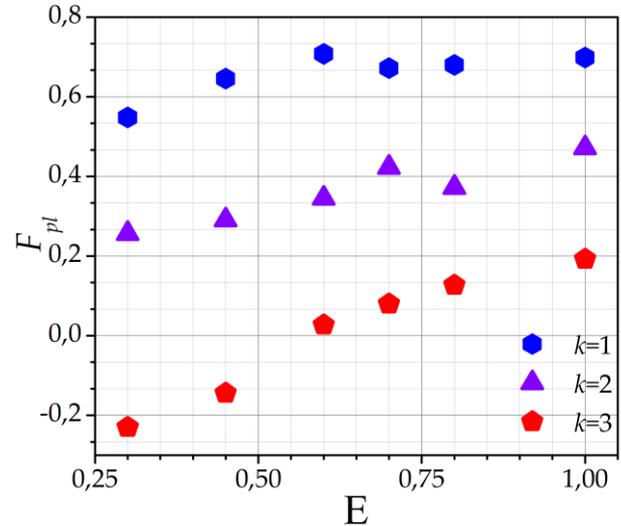


Рис.1. Зависимость величины силы действия объёмного заряда плазмы на цепочку пылевых частиц от амплитуды внешнего электростатического поля.

Список литературы:

1. Yaroshenko V., et al Possible Mechanisms of String Formation in Complex Plasmas at Elevated Pressures // Molecules, vol. 26, pp. 308, 2021
2. Matthews L.S., et al., Dust charging in dynamic ion wakes // Phys. Lett. A vol 27 no 2, pp. 023703, 2020.
3. Sukhinin G.I. et. al., Effect of ion mean free path length on plasma polarization behind a dust particle in an external electric field // Contributions to Plasma Physics 2019, 59, e201800152.

УДК 536

ВЛИЯНИЕ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И КАЧЕСТВО НАНОЧАСТИЦ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НАНОПОРОШКОВ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Труфанов Д.Ю.¹, Зобов К.В.¹, Бардаханов С.П.¹, Гапоненко В.Р.¹, Чакин И.К.²

¹ Институт теоретической и прикладной механики им.С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

² Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11

В современной промышленности широко распространено использование наноразмерных порошков. Прежде всего их использование связано с большой удельной поверхностью, в которой наноразмерный порошок может взаимодействовать с окружающей средой. Кроме того, экспериментально показано что разные способы получения порошков могут приводить к различным свойствам поверхности. Эта работа изучает процесс синтеза нанопорошков из газовой фазы при получении паров материала нагревом пучком электронов высокой энергии [1]. В качестве источника нагрева использовался ускоритель ЭЛВ-6 с энергией электронов 2 МэВ.

В предыдущих работах исследовалось влияние параметров получения нанопорошка на его удельную поверхность [2]. Работы проводились на реакторе среднего размера в диаметре 150мм. Варьировались параметры мощности электронного пучка и расхода газа, проходящего через реактор. Эксперименты показали, что куб удельной поверхности линейно зависит от комбинированного параметра QH^2/W , Q – расход газа через реактор, H – высота от точки выхода электронного пучка до мишени из кварца и W – мощность электронного пучка.

Данная работа представляет собой развитие знаний, полученных на среднем реакторе применительно к полупромышленной установке. Характерные размеры испарительной камеры уже составляют 800мм, существенно увеличена мощность энергии электронов в пучке с 25кВт до 90кВт.

Исследовалось влияние мощности пучка на производительность установки по получению порошка. При росте нагрева, растет температура в центральной области взаимодействия электронного пучка с сырьем, в результате это приводит не только к более интенсивному испарению, но и к большей потере энергии на излучение. При испарении в реакторе конкурируют два процесса, уход тепла через испарение и уход тепла через излучение, второе происходит пропорционально четвертой степени при температуре. Было установлено что при длительном воздействии электронного пучка на сырье происходит плавление материала в области существенно большей чем пятно контакта электронного пучка, в результате в зоне взаимодействия образуется жидкая фаза. В дальнейшем количество жидкой фазы увеличивается, а температура внутри нее быстро выравнивается за счет конвективных потоков, это приводит к тому, что весь объем жидкой фазы

излучает примерно одинаково. В результате этого процесса температура в центре пятна взаимодействия падает, вместе с этим и падает производительность.

Дальнейшим направлением исследований было сравнение производительности получения наноразмерного порошка при одинаковой мощности ускорителя при температуре сырья в начале пуска 20°C с аналогичными показателями, когда сырье было предварительно нагрето до 200°C. Было установлено что производительность при нагреве сырья падает примерно в полтора раза. Угол расхождения электронного пучка примерно равен 10°.

Были проведены эксперименты по установлению зависимости производительности установки при постоянной мощности 90кВт, от расстояния от точки выхода пучка в атмосферу до контактного пятна на сырье. Не смотря на кажущуюся простоту задачи, вместе с изменением расстояния меняется не только диаметр пятна контакта, но это в целом меняет картину в реакторе. Желоб от взаимодействия пучка и сырья при приближении становится уже, это влияет на долю тепла, которое уходит за счет излучения, что увеличивает производительность, к тому же ухудшает поток воздуха, отводящего пары что ухудшает производительность. Эксперименты были проведены для случая с холодным и нагретым сырьем. В результате для обоих случаев было показано что зависимость производительности от расстояния до мишени линейная.

В результате проведенной работы были установлены характеристики взаимодействия высокоскоростного электронного пучка непрерывного действия на с мишенью из диоксида кремния. Выработаны рекомендации по улучшению производительности полупромышленной установки.

Список литературы:

1. Бардаханов С.П., Корчагин А.И., Куksанов Н.К., Лаврухин А.В., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Черепков В.В. /Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении. Доклады Академии наук. 2006. Т. 409. № 3. С. 320-323.
2. Завьялов А.П. Тепло-массообмен в сублиматоре установки по получению нанопорошков //XXXI Сибирский теплофизический семинар, 17-19 ноября 2014г, Новосибирск, сборник тезисов 181с.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ госрегистрации 121030500149-8)

УДК 537.5

ФОРМИРОВАНИЕ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Федосеев А.В., Ефименко Д.Б., Васильева Е.В., Литвиненко В.В., Васильев М.М., Петров О.Ф.

Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

Явление самоорганизации в открытых диссипативных системах широко распространено в природе и исследуется в различных областях науки [1]. Одним из примеров такой самоорганизации является формирование упорядоченных структур пылевых частиц в низкотемпературной лабораторной плазме [2]. Наряду с широко известным двумерным кристаллом пылевых частиц с гексагональной структурой, левитирующим над нижним электродом высокочастотного разряда, были также получены квазиодномерные линейные цепочки пылевых частиц в страте разряда постоянного тока [2]. Отметим, что одномерная цепочка пылевых частиц является простейшим и легко контролируемым объектом для исследования взаимодействующих частиц, передачи импульса и энергии, структурных и динамических переходов и распространения волн.

Несмотря на более чем двадцатилетнюю историю изучения формирования упорядоченных пылевых структур, для построения полной картины явления с учетом всех основных физических механизмов необходимы дальнейшие как численные [3,4], так и экспериментальные исследования. На Рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для исследования формирования квазиодномерных пылевых структур в плазме тлеющего разряда постоянного тока. Пылевые частицы, имеющие отрицательный заряд, улавливаются электрическими полями на оси разряда в нижней части области свечения страты, расположенной над диэлектрической конической вставкой в нижней части разрядной трубки. При этом возможно формирование как стабильной однородной цепочечной структуры пылевых частиц, так и различных динамических явлений в структуре частиц.

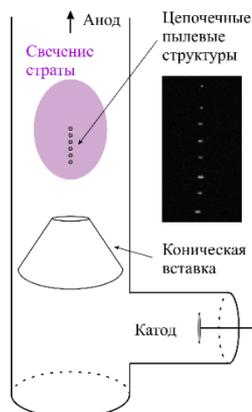


Рис.1. Схема экспериментальной установки для получения и исследования квазиодномерных пылевых структур в плазме тлеющего разряда постоянного тока.

На вставке к Рис.1 представлена фотография цепочки из восьми пылевых частиц, полученная при сле-

дующих параметрах: радиус частиц ~ 1 мкм, длина цепочки 2.1 мм, среднее межчастичное расстояние 300 мкм, ток разряда 1.017 мА, напряжение разряда 1914 В, разрядная трубка диаметром 4 см и длиной 100 см, давление неона 0.136 Тор, размер области свечения страты 12 мм, расстояние между центрами соседних страт 23 мм. В работе также проведены оценки других параметров плазмы: среднее значение напряженности электрического поля $\langle E \rangle \sim 10$ В/см, плотность электронов и ионов $n_0 \sim 10^8$ см $^{-3}$, температура электронов $T_e \sim 5$ эВ, заряд пылевых частиц $Q_d \sim -10^4 e$.

Электрическое поле, неоднородное вдоль оси трубки стратифицированного разряда, увеличивается к голове страты, поэтому вся цепочка пылевых частиц находится в равновесном положении по вертикали в поле силы тяжести. Например, при смещении цепочки вниз, она попадает в область большего электрического поля, и появляется результирующая возвращающая сила. Помимо этого, большую роль играют сила кулоновского расталкивания между частицами и сила ионного увлечения. В результате дрейфового потока ионов в сторону катода образуется так называемый ионный «вейк» – область фокусировки положительно заряженных ионов за отрицательно заряженной частицей, который ответственен за выстраивание пылевых частиц в цепочку. В работе проведена оценка и анализ сил, действующих на частицы цепочки, и определено их влияние на структурные и динамические свойства цепочки пылевых частиц.

Были также проведены экспериментальные работы по манипулированию частицами лазером. С помощью лазерного воздействия была «удалена» одна из частиц, формирующих цепочку. При этом впервые экспериментально обнаружено формирование «вакансий» в цепочечной структуре. Проведен предварительный анализ параметров плазмы разряда и пылевых частиц. Предложен возможный механизм формирования «вакансий» в цепочечных пылевых структурах.

Список литературы:

1. Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations / Glandsdorff, P., Prigogine, I. Wiley-Interscience, London, 1971.
2. Петров О.Ф. и др., Явления самоорганизации в криогенной газоразрядной плазме: формирование пылевого облака наночастиц и плазменно-пылевых волн // ЖЭТФ, 2018. Т. 153, Вып.4, С. 671–676.
3. Salnikov M., et al., Plasma Parameters around a Chain-Like Structure of Dust Particles in an External Electric Field // Molecules, 2021, V. 26 (13), P. 3846.
4. Fedoseev A.V., et al., Structural properties of a chain of dust particles in a field of external forces // Phys. Rev. E, 2022, V. 106 (2), P. 025204.

Работа выполнена при поддержке Российского
научного фонда (грант № 19-12-00354)

УДК 620.3

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ЛАТУНИ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ.

Хартаева Э.Ч.¹, Номоев А.В.¹, Бардаханов С.П.^{1,2}, Зобов К.В.^{1,2}, Труфанов Д.Ю.², Гапоненко В.Р.²

¹ Институт физического материаловедения СО РАН,
670047, Россия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой 6

² Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

В настоящее время наиболее перспективные методы получения наночастиц сочетают в себе экологическую безопасность и высокий выход продукта с наноразмерными частицами. Такой метод представляет собой газофазный синтез с мощным источником электронного излучения [1, 2]. В настоящей работе основной целью эксперимента является выявление возможности получения композитных наночастиц латуни с использованием ускорителя электронов типа ЭЛВ-6.

Актуальность исследования обусловлена как необходимостью получения композиционных нанопорошков меди/цинка для электронных и биомедицинских приложений, так и дальнейшей разработкой высокоэффективного метода получения нанопорошков металл-металл под действием релятивистского электронного пучка.

В качестве источника нагрева материала для получения композиционных наночастиц использована установка электронно-лучевого испарения открытого типа на основе релятивистского ускорителя электронов типа ЭЛВ-6 с энергией 1,4 МэВ и током в диапазоне 5–25 мА [1, 2, 3]. Проведена серия запусков установки; один образец латунной мишени неоднократно расплавлялся и выпаривался. После каждого (последующего) запуска установки образцы синтезированного порошка отбирали из фильтровального бокса для дальнейшего сравнительного исследования и регистрировали изменение массы и внешнего вида облучаемой мишени.

Полученные образцы порошков характеризовали методами просвечивающей микроскопии (ПЭМ), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и рентгеноструктурного анализа. Результаты ПЭМ показали образование наночастиц различной формы: игольчатой, шарообразной и ограненной.

Качественный рентгеноструктурный анализ показал наличие нанопорошков оксида цинка, оксида меди и меди, а также наличие композитных наночастиц Cu/Zn. Количественный рентгенофлуоресцентный анализ показывает, что в каждом последующем пуске содержание меди увеличивается, а содержание цинка уменьшается. В порошках, полученных в первом этапе испарения, содержание цинка показало 98,7 мас.%, а в последнем этапе содержание цинка составляло лишь 2 мас.%, а также наблюдалось изменение геометрии частиц. Композитные наночастицы Cu/Zn обнаружены методом ЭДС на снимках картирования на последних этапах после завершения интенсивного

испарения цинка из расплава латуни. Предполагаем, что композитные наночастицы Cu/Zn создаются в результате конденсации частиц меди на отдельных частицах цинка, которые вследствие низкой концентрации паров цинка не образовали тонких волокон или игольчатой структуры.

Представлен термодинамический расчет температурной зависимости равновесного содержания для конденсированной и газовой фаз меди и цинка (рис. 1).

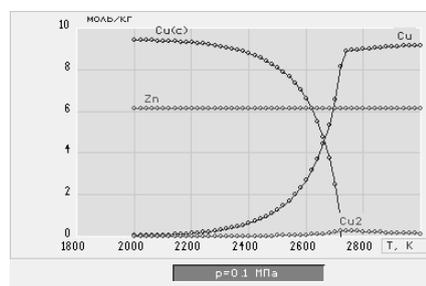


Рис. 1. Термодинамический расчет равновесного содержания меди и цинка в зависимости от температуры.

В работе рассмотрено изменение стехиометрии нанопорошков, полученных при ступенчатом облучении слитка латуни, помещенного в графитовый тигель. Обсуждается механизм образования композитных наночастиц Cu/Zn.

Список литературы:

1. Bardakhanov S.P., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavrukhin A.V., Salimov R.A., Fadeev S.N. and Cherepkov V.V. Obtaining nanopowders by evaporation of initial substances in an electron accelerator at atmospheric pressure// Reports of the Academy of Sciences. 2006. Т. 409. №3. P. 320–323.
2. Yumozhapova N.V., Nomojev A.V., Syzrantsev V.V. and Khartaeva E.Ch. Formation of metal/semiconductor Cu-Si composite nanostructures// Beilstein Journal of Nanotechnology. 2019. Т. 10. P. 2497–2504.
3. A.V. Nomojev, E.Ch. Khartaeva, N.V. Yumozhapova, T.G. Darmaev, S.P. Bardakhanov, V.V. Syzranthev, K.V. Zobov and Y.Y. Gafner, Receiving copper nanoparticles: experiment and modelling, Solid State Phenomena. 2019. Т. 288. P. 140–147.
4. ГОСТ 15527-2004 «Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки».

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФМ СО РАН № FWSF-2021-0002

УДК 533.6.011.8 537.563.2 539.198 544.277.6

ГЕНЕРАЦИЯ В СОПЛЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ СМЕСЕЙ МЕТАНА С БУФЕРНЫМ ГАЗОМ ДЛЯ ИНИЦИАЦИИ ИОННО-КЛАСТЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В СТРУЯХ**Художитков В.Э., Зарвин А.Е., Каляда В.В.**Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова,

Кластерные пучки широко применяются для формирования тонких плёнок, чистки и полировки поверхностей, образования новых частиц и материалов. Наиболее популярным на сегодняшний день методом генерации кластерных пучков является формирование кластеров в сверхзвуковой струе газа или газовой смеси, расширяющейся в разреженное пространство. Данный метод был использован нами в [1] для поиска условий инициации ион-молекулярных реакций в кластерах, а также в [2] при формировании кластерных ионов в сверхзвуковых струях метана и его смесей с инертными газами с помощью высоковольтного электронного пучка, пересекающего сверхзвуковую струю в выбранном сечении. Таким образом, мы попытались реализовать вариант процесса в виде: сначала образование кластеров, а затем – их возбуждение и ионизация для инициации механизмов внутрикластерного энергообмена. К сожалению, нам не удалось сформировать в кластеризованном потоке с помощью высоковольтного электронного пучка достаточное число частиц иного молекулярного состава. Процесс оказался вне пределов чувствительности масс-спектрометрического оборудования.

В настоящей работе рассмотрен альтернативный вариант процесса: сначала формирование в потоке низкотемпературной плазмы, а затем, по возможности – почти одновременно, формирования кластеров из возбужденных и ионизованных частиц в силу создания в потоке в непосредственной близости от сопла условий достаточно высокой плотности для формирования кластеров. Учитывая тот факт, что возбуждение в больших кластерах сохраняется длительное время, мы предполагаем возможность интенсификации внутрикластерных процессов.

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено сверхзвуковое сопло ($D_* = 0.17$ мм, $D_a = 4.45$ мм, $L = 14$ мм) с установленным на нём ионизатором (1) (Рис. 1). С помощью приложенного потенциала между ионизатором и соплом возникает электрический разряд, фокусируемый с помощью кольцевого магнита в области сверхзвукового сопла. Ток в разряде достигает 20-30 мА. Поскольку действие разряда сконцентрировано в области сопла, где струя имеет максимальную плотность, вероятность возбуждения и ионизации частиц струи существенно выше, чем в использованной ранее схеме. В случае ионизации газа разрядом в сопле, в послескиммерной секции молекулярного пучка с помощью цилиндра Фарадея был зарегистрирован ток ионов $I_i^{ch} \sim 15-45$ нА, тогда как в случае ионизации газовой струи высоковольтным электронным пучком ($U_{eb} = 10$ кВ, $I_{eb} = 30$ мА) в

аналогичных газодинамических условиях – ионный ток $I_i^{eb} \sim 0.1-2$ нА, т.е. существенно меньше.

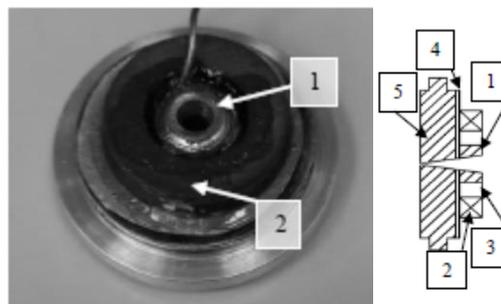


Рис. 1. Сверхзвуковое сопло с ионизатором $D_* = 0.17$ мм, $D_a = 4.45$ мм, $L = 14$ мм: 1 – ионизатор; 2 – кольцевой магнит; 3 – диэлектрик; 4 – изолятор; 5 – металлическая основа.

При применении стандартной схемы формирования молекулярного пучка из сверхзвуковой струи, доставка ионов на масс-спектрометр осуществлялось с помощью скиммера и коллиматора, использованных в качестве электростатических линз. В работе выполнена оптимизация потенциалов, прикладываемых к линзам, для лучшей фокусировки ионов на входную апертуру масс-спектрометра с отключенным собственным ионизационным блоком.

Масс-спектрометрическое исследование продуктов ионизации и кластерообразования было проведено при истечении газовых смесей 80%Ag+20%CH₄ и 80%He+20%CH₄ в диапазоне давлений торможения от 0,05 до 0,4 МПа, т.е. для разных условий кластерообразования в смесях. В работе обсуждаются достоинства и недостатки использованного метода и рассматриваются перспективы ионизации кластеризованного газового потока тлеющим разрядом в сопле.

Список литературы:

1. A E Zarvin, V E Khudozhitkov, et al. Plasma chemical reactions initiation in supersonic jets by a high-voltage electron beam // 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1683 032008 doi:10.1088/1742-6596/1683/3/032008.
2. Zarvin A.E., Kalyada V.V., et al. Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. V. 45. Issue 5. P. 819-8.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Прикладная физика» физического факультета НГУ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSUS-2020-0039)

УДК 551.510; 533.72

ДИНАМИКА АЭРОЗОЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ В РАЗРЕЖЕННОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Черемисин А.А.,¹ Кушнаренко А.В.^{1,2}

¹Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, Институтская 3

²Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета,
660074, Россия, Красноярск, ул. Академика Киренского 26 к/1

Исследование динамики аэрозольных кластеров представляет интерес для совершенствования многих технологических процессов и понимания ряда экологических проблем.

Был разработан алгоритм Монте-Карло [1] для решения задачи тепломассопереноса с целью изучения движения частиц сложной формы и аэрозольных кластеров в приближении свободномолекулярного режима. Решение этой задачи основано на решении уравнений Больцмана. Алгоритм позволяет решить нелинейную задачу тепломассопереноса и оценить силовое воздействие на кластер со стороны разреженной газовой среды в условиях, когда на частицу падают потоки внешнего излучения видимого и ИК диапазонов длин волн. Рассчитывается фотофоретическая сила, её момент и четыре тензора для расчёта силы вязкого трения и её момента. Поступательно-вращательное движение аэрозольного кластера описывается путем интегрирования уравнений движения Ньютона.

Можно рассчитать, также, фотофоретическое взаимодействие аэрозольных частиц и кластеров [2].

В настоящем докладе представлены результаты вычислительного эксперимента по изучению влияния фрактальной размерности сажевых аэрозольных кластеров на их осаждение в разреженной газовой среде как в темноте, так и при освещении. Освещение существенно изменяет поведение частиц из-за возникающей гравитофотофоретической силы. Последняя имеет газинокинетическую природу и обусловлена поглощением кластером потоков энергии излучения инфракрасного и видимого диапазонов. Привлечение фотофоретических сил позволяет объяснить, а также

предсказать возможность существования ряда аэрозольных слоев в стратосфере и мезосфере. Существование слоев в этой области атмосферы подтвердили результаты многолетних лидарных наблюдений с помощью Сибирско-Дальневосточной сети стратосферных лидарных станций.

Предполагается дальнейшее развитие исследований движения аэрозольных кластеров с учетом влияния диффузионных процессов. Для описания стохастической динамики вращательно-поступательного движения аэрозольных кластеров с учетом флуктуаций молекулярных потоков газовой среды разработан алгоритм Монте-Карло [3], основанный на использовании матриц переноса. В общем случае, кластер погружен в разреженную газую среду, температуры его поверхностей могут отличаться от температуры окружающего газа, например, вследствие поглощения им излучений видимого и инфракрасного диапазонов. Движение кластера описывается на основе уравнений движения Ланжевеновского типа.

Список литературы:

1. Cheremisin A. A. Transfer matrices and solution of the heat-mass transfer problem for aerosol clusters in a rarefied gas medium by the Monte Carlo method // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling (Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling). - 2010. - Vol. 25. - No. 3. - pp. 209-233.
2. A.A. Cheremisin, A.V. Kushnarenko. Photophoretic interaction of aerosol particles and its effect on coagulation in rarefied gas medium // J. Aeros. Sci. - 2013. - Vol. 62. - P. 26-39.
3. Alexander A. Cheremisin. Transfer matrices and solution of the problem of stochastic dynamics of aerosol clusters by Monte Carlo method // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2022. V.37(1). P.1-14.

УДК 533.6.011.8 532.525.2

ВЛИЯНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ КЛАСТЕРОВ АРГОНА НА СВЕРХЗВУКОВОЕ ИСТЕЧЕНИЕ В РАЗРЕЖЕННУЮ АТМОСФЕРУ

Ярков Л.В., Зайцев А. В., Бондарь Е.А.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Вопросам установившегося истечения газа в разреженное пространство посвящено множество научных работ, как экспериментальных, так и расчетных [1-4]. Такой большой исследовательский интерес связан, во-первых, с незатухающей значимостью задачи, а, во-вторых, с необходимостью комплексного подхода к ее решению. Актуальность задачи связана с необходимостью разработки новых двигателей для работы непосредственно в открытом космосе, двигателей маневрирования и ориентации для спутников различных размеров. Трудность же задачи заключается в том, что при численном моделировании требуется метод, который мог бы позволить учесть многофазность потока, переход от континуального режима течения к свободномолекулярному, а также неравновесные физические процессы и конденсацию.

В данной работе исследуется кинетическая численная модель процесса гомогенной конденсации аргона в струе, истекающей в разреженное пространство, для прямого численного моделирования Монте-Карло, разработанная на основе материалов работы [5]. Модель позволяет учесть эффекты разреженности, неравновесность и конденсацию возникающие, в потоке, включает процесс трёхчастичной рекомбинации, приводящей к образованию димеров, процесс прилипания мономеров к кластерам, испарения мономеров из кластеров и коалесценции кластеров.

Предложенная модель была реализована на основе программного комплекса SMILE++ [6, 7], разработанного в лаборатории вычислительно аэродинамики Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича.

Численные эксперименты по моделированию равновесия между мономерами и димерами аргона стали основой для валидации модели. Равновесное состояние между димерами и мономерами характеризуется константой равновесия K_{eq} :

$$K_{eq}(T) = \frac{x_{Ar_2}}{x_{Ar}^2},$$

где x_{Ar} , x_{Ar_2} – равновесные концентрации мономеров и димеров, соответственно, T – равновесная температура. Верификация численной модели была выполнена при помощи сравнения вычисленных констант равновесия и литературных данных [8, 9] (см. рис. 1).

Используя данные численные модели были выполнены расчёты по истечению струй аргона в разреженное пространство при разных давлениях и температурах торможения в форкамере для изучения их влияния

на параметры потока и оценки влияния кластеризации на поток.

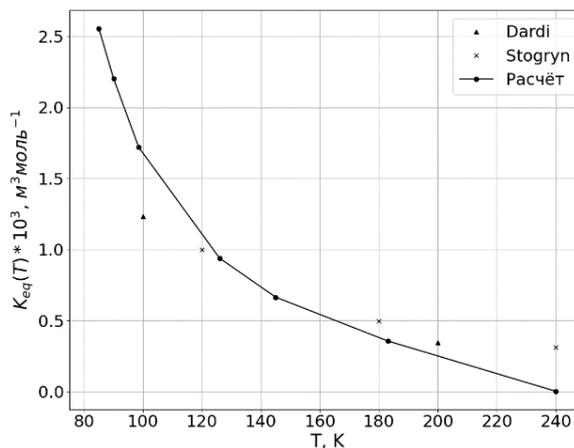


Рис. 1. Сравнение расчётных и литературных значений константы рекомбинации

Список литературы:

1. Rebrov A. K. Free jets in vacuum technologies //Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2001. Т. 19. №. 4. С. 1679-1687.
2. Zarvin A. E. et al. Visualization of low-density gas-dynamic objects in full-scale processes modelling on small experimental plants //Vacuum. 2021. Т. 191. С. 110409.
3. Ivanov M. S. et al. Free-flight experiment and numerical simulation for cold thruster plume //Journal of propulsion and power. 1999. Т. 15. №. 3. С. 417-423.
4. Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Сквородко П.А., Ярыгин И.В. Истечение газа из сверхзвукового сопла с экраном в вакуум // Теплофизика и аэромеханика 23.6 (2016): 975-978.
5. Jansen R. et al. Nonequilibrium numerical model of homogeneous condensation in argon and water vapor expansions //The Journal of chemical physics. 2010. Т. 132. №. 24. С. 244105.
6. Kashkovsky A. V. et al. Object-Oriented Software Design of Real Gas Effects for the DSMC Method //AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2005. Т. 762. №. 1. С. 583- 588.
7. Ivanov M. S. et al. Parallel Object-Oriented Software System for DSMC Modeling of High-Altitude Aerothermodynamic Problems //AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2011. Т. 1333. №. 1. С. 211-218.
8. Stogryn D.E., Hirschfelder J.O. Contribution of bound, metastable, and free molecules to the second virial coefficient and some properties of double molecules //The Journal of Chemical Physics. 1959. Т. 31. №. 6. С. 1531-1545.
9. Dardi P.S., Dahler J.S. Equilibrium constants for the formation of van der Waals dimers: Calculations for ArAr and MgMg //The Journal of chemical physics. 1990. Т. 93. №. 5. С. 3562-3572.

Работа выполнена за счет гранта
Российского научного фонда
(проект № 22-19-00750)

60 ЛЕТ В СТРУЕ

Ярыгин В.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Практический интерес к сверхзвуковым струйным течениям разреженного газа возник в конце 40-х годов прошлого столетия в связи с развитием авиационной и ракетно-космической техники. Активное формирование научной тематики и научных коллективов первых институтов Сибирского отделения Академии наук СССР, включая Институт теплофизики – с 1994 года Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН), совпало исторически с выдающимися достижениями нашей страны в освоении космоса – запуском первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 года и полётом Ю.А. Гагарина 12 апреля 1961 года. Одно из таких новых научных направлений ИТ СО РАН – динамика разреженных газов, сформировалось и получило активное развитие под руководством тогда молодого учёного, ныне академика РАН А.К. Реброва.

Алексей Кузьмич Ребров внес определяющий вклад в разработку и создание вакуумного газодинамического комплекса Института, постановку и проведение фундаментальных исследований и практических приложений струйных течений малой плотности, а также установление международных связей и сотрудничества в этой области. В результате Институт теплофизики стал известным в мире центром молекулярной газодинамики [1], признанием чего явилось проведение на его базе XII Международного Симпозиума по динамике разреженных газов в 1982 году.

Основное внимание в докладе уделено истории создания и развития вакуумных газодинамических установок в ИТ СО РАН, а также полученным результатам по газодинамике сверхзвуковых струй, включая приложения к струям двигателей управления и ориентации реальных космических аппаратов. Уже в 1964 году вошёл в строй первый вакуумный стенд ВС-2 [2], на котором были отработаны основные принципиальные вопросы получения и диагностики сверхзвуковых течений разреженного газа (плазменный подогрев газа, методы криоконденсационной откачки, электронно-пучковая диагностика по излучению в оптической и рентгеновской областях спектра). В 1973 году была введена в строй первая очередь вакуумного газодинамического комплекса, состоявшего из четырёх газодинамических стендов различного назначения, включая генератор молекулярного пучка. В дальнейшем были построены крупномасштабные установки ВИКА (1980 год) и ВИКИНГ (1985 год) объемами 35 и 150 м³, соответственно, существенно расширившие возможности проведения фундаментальных и прикладных исследований в области термогазодинамики разреженных сред.

Процессы переноса энергии и вещества в таких струях, называемых часто сильно недорасширенными или неизобарическими, протекают, как правило, в неравновесных условиях при существенном влиянии локальных актов молекулярного взаимодействия [3].

На основе измерений локальной плотности исследовано влияние неравновесных процессов (гомогенной конденсации и колебательной релаксации) на газодинамику сверхзвукового струйного истечения в вакуум Ar, Kr, CO₂ и паров H₂O из звуковых и сверхзвуковых сопел. Установлены граница и глубина влияния этих процессов. Показано, что конденсация может определяющим образом влиять на газодинамику процесса истечения, приводя к многократному понижению плотности относительно соответствующих изоэнтропических значений. Исследовано влияние температурного фактора на структуру начального участка струй одноатомного газа в режимах течения от сплошного до рассеяния. Для турбулентного режима течения в слое смешения исследована пульсационная структура начального участка струи. Измерены величина и область существования турбулентных пульсаций плотности. Обнаружено, что процессы обмена в слое смешения осуществляются скоплением молекул (молей, квазичастиц), характерный размер которых составляет величину порядка 100 длин свободного пробега.

Развит интегральный метод моделирования натуральных струй большой нерасчетности, в котором в качестве основного параметра подобия используется характерный угол расширения струи. Представлены результаты по моделированию в вакуумных камерах струй двигателей управления и ориентации различных космических аппаратов, включая Международную космическую станцию, целью которых было определение силового, теплового и загрязняющего воздействия этих струй на элементы конструкции космических аппаратов. Предложены подходы и решения, позволившие на несколько порядков уменьшить загрязнения внешней поверхности Международной космической станции.

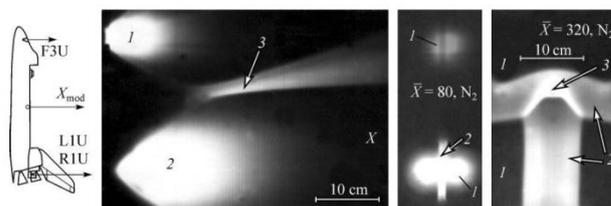


Рис. 1. Структура поля течения для модели Space Shuttle. Зона свободной струи (1), зоны взаимодействия двух (2) и трех (3) струй.

Список литературы:

1. Кутателадзе С.С., Ярыгин В.Н., Ребров А.К. Некоторые проблемы молекулярной газодинамики // Вестник АН СССР. 1984. №4. С. 79-85.
2. Ребров А.К., Ярыгин В.Н. Вакуумная газодинамическая установка с электродуговым подогревом газа // ТВТ. 1967. №1. С. 182-183.
3. Ребров А.К., Ярыгин В.Н. Молекулярная газодинамика и неравновесные процессы // ТиА. 1997. Т.4. №2. С. 171-179.

СЕКЦИЯ 2

Конвективные течения и теплообмен в однофазных средах

УДК 621.039.58

НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ КОДА HYDRA-IBRAE/LM ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССОВ В РУ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**Алипченков В.М., Грудцын Я.В., Мосунова Н.А., Палагин А.В.**

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

Россия, 115191, г. Москва, Большая Тульская ул., д. 5

В соответствии с требованиями федеральных норм и правил, безопасность проекта атомной электростанции должна быть обоснована результатами численных исследований различных режимов эксплуатации реакторной установки (РУ). В мировой практике одними из основных программ, на которые приходится большой объем расчетных обоснований, являются контурные теплогидравлические коды улучшенной оценки, к неоспоримым преимуществам которых относятся широкий набор моделируемых режимов, обеспечение требуемой точности расчетов и высокая скорость счета. Одним из таких отечественных кодов является разрабатываемый в Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН) код HYDRA-IBRAE/LM, который предназначен для анализа нестационарных теплогидравлических процессов, протекающих в контурах РУ с жидкометаллическим теплоносителем, включая контуры с натриевым, свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями, воздушные теплообменники и пароводяной контур [1].

В данном сообщении акцент сделан на недавно разработанных специальных моделях, необходимых для моделирования реакторных установок со свинцовым теплоносителем типа БРЕСТ-ОД-300 в случае разрыва трубок парогенератора (ПГ) с попаданием в теплоноситель 1-го контура пароводяной смеси (ПВС) и замерзания свинцового теплоносителя в ПГ из-за избыточного теплоотвода, что может произойти, например, из-за разрыва парового коллектора высокого давления.

При попадании воды в тяжелый жидкий металл в нем могут образоваться пароводяные пузырьки. Термическое сопротивление парового слоя, отделяющего воду от жидкого металла, достаточно высокое, таким образом, тепловой поток от металла к воде весьма мал. Оценки показывают, что полное испарение воды в пузырьке в контуре с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем при скоростях потока 1–3 м/с может происходить на расстоянии в десятки метров от места течи [2]. Наличие пароводяных пузырьков будет в значительной степени определять как теплообмен, так и физические свойства среды. Предполагая, что пар и вода находятся в термодинамическом равновесии, для описания данного процесса в модели кода HYDRA-IBRAE/LM в уравнения состояния пароводяной смеси добавляется один параметр – доля пара в ПВС, от которой зависят энтальпия и плотность более легкой фазы. Это позволяет использовать при расчетах реалистичные теплофизические свойства ПВС, не меняя системы уравнений.

Процесс теплообмена тяжелого жидкометаллического теплоносителя с ПВС в значительной мере опре-

деляется размером пароводяных образований, который изменяется в процессе испарения воды и движения в свинцовом теплоносителе. Для описания эволюции плотности межфазной поверхности в коде HYDRA-IBRAE/LM реализованы два подхода – модель, основанная на решении транспортного уравнения, и модель, использующая многогрупповое приближение (по размерам пузырей), основанное на кинетическом уравнении для функции распределения по размерам частиц [3]. Использование многогруппового приближения, в частности, позволяет описать ситуацию, при которой пузыри меньшего размера увлекаются потоком теплоносителя, а пузыри большего размера всплывают и выходят в газовую подушку.

Модель замерзания свинцового теплоносителя в коде HYDRA-IBRAE/LM позволяет определять толщину слоя намерзшего свинца и таким образом моделировать блокировку проходного сечения для течения теплоносителя. Перенос твердого свинца с потоком теплоносителя не рассматривается. Если температура стенки падает ниже температуры плавления свинца, алгоритм переключается на решение тепловой задачи в слое твердого свинца с температурой плавления в качестве граничного условия. При этом изменение массы твердого свинца ($\text{кг}/\text{м}^2$) на шаге Δt определяется разницей потока тепла в слое твердого свинца W_s и потока тепла в жидкости W_f ($\text{Вт}/\text{м}^2$) на границе:

$$\Delta m = - \frac{W_s - W_f}{\Lambda} \Delta t.$$

где Λ – теплота плавления свинца ($\text{Дж}/\text{кг}$).

В модели учитывается изменение потерь давления на трение из-за изменения проходного сечения каналов.

Представленные модели позволяют повысить реалистичность моделирования по коду HYDRA-IBRAE/LM сценариев, при которых происходит разрыв трубок парогенератора или замерзание свинцового теплоносителя.

Список литературы:

1. Mosunova N.A., Alipchenkov V.M., Pribaturin N.A., Strizhov V.F., Usov E.V., Lobanov P.D., Afremov D.A., Semchenkov A.A., Larin I.A. Lead coolant modeling in system thermal-hydraulic code HYDRA-IBRAE/LM and some validation results // Nuclear Engineering and Design, 2020. Vol.359. № 1104631. 11 p.
2. Безносос А.В. и др. Экспериментальное исследование гидродинамики течения свинцового теплоносителя и воды через экспериментальный участок «дроссель-кольцевой зазор» // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2012. №. 1. С. 80-90.
3. Алипченков В.М., Грудцын Я.В., Мосунова Н.А. Моделирование переноса газовой фазы в потоке тяжелого жидкометаллического теплоносителя в теплогидравлическом коде HYDRA-IBRAE/LM // Атомная энергия. 2020. Т. 129. №. 3. С. 134-141.

ОПТИЧЕСКАЯ ГИЛЬБЕРТ-ТОМОГРАФИЯ ГАЗОВЫХ СТРУЙ

Арбузов В.А.^{1,2}, Арбузов Э.В.^{1,2,3}, Дубнищев Ю.Н.^{1,2}, Лукашов В.В.¹, Золотухина О.С.¹¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20³ Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 4

Методы оптической томографии нашли широкое применение в диагностике газо- и гидродинамических потоков, плазмы, явлений тепло- и массообмена и т.д. Для получения проекционных данных в оптической томографии обычно используются классические способы регистрации волнового фронта [1, 2].

Гильберт-преобразование – интегральная операция, выполняющая перераспределение энергии оптического сигнала в заданной полосе пространственных частот зондирующего поля [3]. При этом минимизируются энергетические потери сигнала.

В работах [4, 5] представлены исследования газовых и реагирующих сред (пламён) методами гильберт-оптики в приближении осевой симметрии объекта визуализации. Гильберт-фильтрация с высокой чувствительностью диагностирует поля фазовой оптической плотности исследуемой среды, обработка которых позволяет оценивать температурные поля и молярные концентрации продуктов горения.

На базе теневого прибора ИАБ-463М разработан томографический комплекс, позволяющий выполнять четырёхракурсное зондирование исследуемой среды с одновременной регистрацией томографических проекций в виде гильберт-визуализированных фазовых структур (рис. 1).

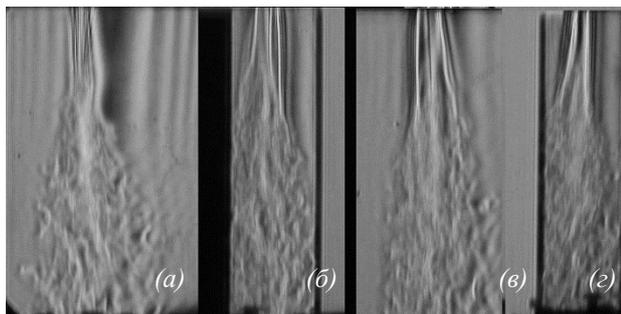


Рис. 1. Четырёхракурсная гильберт-визуализация изотермического течения струи фреона-22, вытекающей из трубки эллиптического течения в неподвижный воздух: (а) – боковая проекция, (б) – вид 45°, (в) – проекция 135°, (г) – фронтальная проекция.

Для восстановления требуемых параметров в исследуемых объектах по данным гильберт-томографии в дальнейшем предлагается использование итерационной схемы Гершберга [3]. Алгоритм Гершберга можно представить, как итерационные переходы от оценки объекта в спектральной плоскости к его оценке в пространственной области с внесением в процессе их выполнения априорной информации о каждой из областей:

1. По известному набору проекций вычисляется набор одномерных фурье-образов, которые по теореме о центральном сечении позволяют в частотном пространстве получать фурье-образы искомого решения на лучах, выходящих из начала координат под углами, совпадающими с углами наблюдения проекции. На этом этапе значения спектральных амплитуд зануляются вне данных лучей, а также вне граничной частоты.

2. Выполняется обратное двумерное быстрое преобразование Фурье (БПФ) для получения оценки томограммы.

3. Вносится априорная информация о положительности функции, описывающей томограмму, и ограниченности области её задания.

4. Выполняется прямое двумерное БПФ от оценки томограммы с предыдущего шага. Значения спектра на лучах, определённых на шаге 1, заменяются вычисленными ранее непосредственно по проекциям. Учитывается априорная информация о спектре объекта.

5. Проверяются критерии окончания итерационной процедуры. Если они не выполняются, то осуществляется переход на шаг 2. Критериями окончания итерации могут быть малость нормы отклонения полученной томограммы от её оценки на предыдущем шаге, равенство нормы отклонения одномерных и двумерных оценок фурье-спектров объекта на лучах норме шума в проекциях (критерий невязки).

В результате многократного выполнения операций со 2-й по 5-ю спектр реконструируется на всей частотной плоскости и обеспечивается высокое качество восстановленной томограммы.

Список литературы:

1. Sung Y. Snapshot holographic optical tomography // Physical Review Applied. 2019. Vol. 11. P. 014039.
2. Stoykova E., Gotchev A., Sainov V. Analysis of a multi-wavelength multi-camera phase-shifting profilometric system for real-time operation // Optics Communications. 2011. Vol. 284. P. 88-97.
3. Методы гильберт-оптики в измерительных технологиях / В.А. Арбузов, Ю.Н. Дубнищев; Отв. ред. проф. Ю.В. Чугуй. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 316 с.
4. Arbuzov V.A., Arbuzov E.V., Dubnishchev Yu.N., Zolotukhina O.S., Lukashov V.V., Tupikin A.V. Hilbert-optic diagnostics of hydrogen-oxygen inverse diffusion flame // Energies. 2022. Vol. 15, No. 24. P. 9566.
5. Дубнищев Ю.Н., Арбузов В.А., Арбузов Э.В., Золотухина О.С., Лукашов В.В. Полихроматическая диагностика пламени с гильберт-верификацией визуализированной фазовой структуры // Научная визуализация. 2021. Т. 13, № 4. С. 1-8.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121031800217-8, ИМ СО РАН № FWNF-2022-0009

УДК 621.9

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ ПАРАФИНА В КИРПИЧЕ С ВОЗДУШНОЙ ПОЛОСТЬЮ

Бондарева Н.С., Шеремет М.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Материалы с изменяемым фазовым состоянием получают все более широкое распространение благодаря способности поглощать и высвобождать большое количество энергии практически при постоянной температуре. Использование таких материалов позволяет сглаживать температурные скачки и пассивно сохранять энергию, что используется при охлаждении электроники, в энергетике, а также в строительной сфере. В элементах крыш и стен зданий использование скрытой энергии позволяет сглаживать суточные колебания температуры, снижая энергетические затраты [1, 2]. В данной работе рассматривается влияние воздушной конвекции и фазовых переходов на теплоперенос в кирпиче при нестационарных внешних условиях.

Рассматривается замкнутая прямоугольная область, содержащая полость, заполненную парафином и воздушную полость (см. рис. 1). В начальный момент времени температура в области была ниже температуры плавления парафина. На левой и правой границах области было установлено условие конвективного теплообмена с постоянными коэффициентами теплоотдачи. Температура слева T_{out} менялась по гармоническому закону с суточным периодом. Со стороны правой границы температура среды T_{in} была постоянной. Горизонтальные границы считались теплоизолированными.

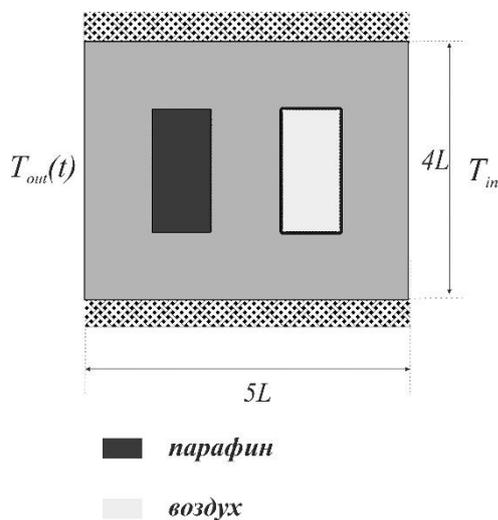


Рис. 1. Область решаемой задачи.

Математическая постановка задачи была сформулирована в преобразованных переменных «функция тока – завихренность». Численное решение было проведено на основе метода конечных разностей с использованием разностных схем второго порядка точности. Полученные системы линейных алгебраических уравнений разрешались на основе прямых и итерационных методов [3].

Математическое моделирование проведено в широком диапазоне изменения определяющих параметров. На рисунке 2 представлены типичные изотермы и линии тока для блока с полостью, заполненной материалом с температурой плавления 22°C в разные моменты времени. Из рисунка 2а видно, что кирпич прогревается в левой части, при этом в расплаве наблюдается сгущение изотерм, что свидетельствует об интенсивном теплообмене. Сдерживание роста температуры связано с поглощением энергии на межфазной границе.

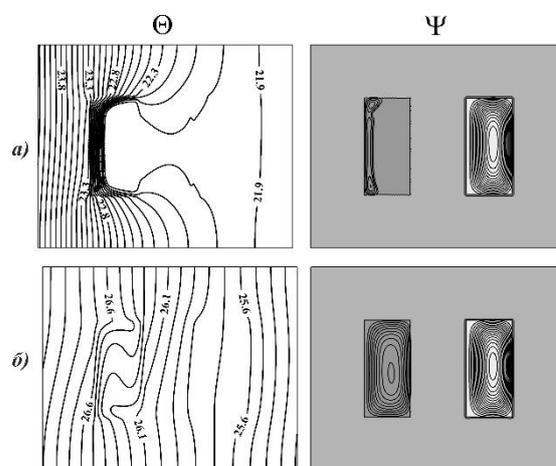


Рис. 2. Поля температур и линии тока для случая $T_{out} = 20 + 10\sin(2\pi t/P_1)^{\circ}\text{C}$ в моменты времени:

а) $t = 4$ часа; б) $t = 6$ часов.

Естественная конвекция в воздушной полости оказывает незначительное влияние на теплообмен, несмотря на более высокие скорости по сравнению с расплавом. После того, как материал полностью расплавился, температура во всей области значительно возрастает. На основе полученных вычислений также было проанализировано влияние внешних условий и геометрических характеристик области решения.

Список литературы:

1. Abbas H.M. Experimental and numerical investigation of PCM capsules as insulation materials inserted into a hollow brick wall / H.M. Abbas, J.M. Jalil, S.T. Ahmed // Energy and Buildings. 2021. Vol. 246. 111127.
2. Guo J. Investigating the performance of the PCM-integrated building envelope on a seasonal basis / J. Guo, G. Zhang // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2021. Vol. 124. P. 91–97.
3. Bondareva N.S. Heat transfer performance in a concrete block containing a phase change material for thermal comfort in buildings / N.S. Bondareva, M.A. Sheremet, // Energy and Buildings. 2022. Vol. 256. 111715.

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 22-79-10341)

УДК 533.6.011.6

ТЕПЛООБМЕН ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОТРЫВНОМ ОБТЕКАНИИ УГЛА СЖАТИЯ

Босняков С.М.¹, Запрыгаев В.И.², Кавун И.Н.², Трубицына Л.П.²

¹ Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, 140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского 1

² Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская 4/1

Развитие методов математического моделирования требует получения надёжных экспериментальных данных, предназначенных для валидации теоретических и численных результатов. В докладе представлены результаты измерения теплового потока на канонических задачах – теплообмене на поверхности шара и пластины, а также в отрывном течении, формирующемся при сверхзвуковом отрывном обтекании угла сжатия. В работе представлено сравнение экспериментальных данных с результатами численного расчёта, см. также [1].

Один из возможных методов определения величины теплового потока в пограничном слое связан с аналогией Рейнольдса, в которой установлено взаимное соответствие параметров теплообмена и трения. Показано расчётное и экспериментальное соответствие результатов, полученных этим методом на пластине, а также их существенное различие в области отрыва в угле сжатия.

Эксперимент проведён в аэродинамической трубе Т-326 ИТПМ СО РАН. Исследуемые модели шара и угла сжатия показаны на рис. 1, 2. Число Маха набегающего потока $M_\infty = 6$, число Рейнольдса $Re_1 = 12,7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Температурный фактор модели $T_w/T_0 = 0,72 \dots 0,79$.

Эксперимент включал в себя теньевую визуализацию течения и измерение величины теплового потока калориметрическими датчиками.

На рис. 1 слева показана теньевая фотография обтекания модели шара, справа – зависимость числа Стантона St_0 в точке растекания от величины температурного фактора T_w/T_0 . Здесь T_0 – температура торможения набегающего потока, T_w – начальная температура стенки модели, St_0 – число Стантона, вычисленное по температуре T_0 . Сравнение с формулой Фэя – Ридделла показало различие в 1%.

Шлирен-визуализация отрывного обтекания угла сжатия показана на рис. 2 вверху. На фотографии показано положение и размеры чувствительных элементов пяти датчиков в соответствующем масштабе с указанием их расположения на модели. График, иллюстрирующий зависимость числа Стантона St_0 от величины температурного фактора T_w/T_0 , показан на рис. 2 внизу. Величина теплового потока за линией присоединения вне области отрыва существенно выше (датчик 5), чем внутри неё. Более того, эта величина превышает и величину теплового потока в точке растекания на поверхности шара (рис. 1, справа).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН.

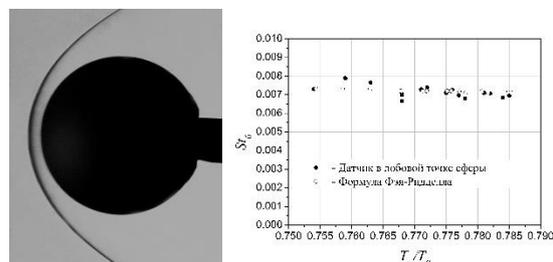


Рис. 1. Теньевая фотография обтекания сферы (слева) и зависимость числа Стантона от температурного фактора (справа) при числе Маха набегающего потока $M = 6$.

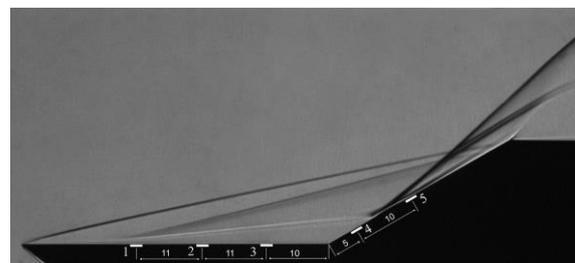


Рис. 2. Шлирен-фотография обтекания модели угла сжатия (вверху) и зависимость числа Стантона от температурного фактора (внизу) при числе Маха набегающего потока $M = 6$.

Список литературы:

1. Zaprygaev V.I., Kavun I.N., Trubitsyna L.P. Heat transfer in supersonic separated flow of the compression corner // Journal of Physics: Conference Series : XXXV Siberian Thermophysical Seminar (Novosibirsk, 27-29 Aug. 2019). – S.I.: IOP Publishing, 2019. – Vol. 1382. – P. 012049(6). DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012049.

УДК 536.24

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ РАСПЛАВА В НЕПОДВИЖНОМ ТИГЛЕ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ В МЕТОДЕ ЧОХРАЛЬСКОГО В РЕЖИМЕ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ

Бердников В.С., Винокуров В.А., Винокуров В.В., Кислицын С.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Основным методом получения высококачественных монокристаллов для микроэлектроники и лазерной техники из расплавов является метод Чохральского. Этот метод наиболее производительный и применим для получения кристаллов в широком диапазоне теплофизических и кристаллографических свойств материалов. Метод многовариантен, широко используется и постоянно совершенствуется, так как требования к совершенству кристаллов непрерывно возрастают. Технологический процесс вытягивания кристаллов из расплавов многопараметрический. Ключевой проблемой является оптимальное управление конвективным теплообменом на всех стадиях роста кристалла. Одна из плохо исследованных проблем – влияние монотонного снижения уровня расплава в тигле при вытягивании кристалла на гидродинамику и конвективный теплообмен. Эта проблема особенно актуальна при реализации низкоградиентного варианта метода получения монокристаллов из оксидных расплавов [1], в котором относительная высота слоя расплава H/R_T меняется в широких пределах. В данном методе кристалл вытягивается со свободной поверхности расплава, поэтому во всех его вариантах между холодным фронтом кристаллизации (ФК) и нагретыми боковыми стенками тигля всегда есть радиальный градиент температуры и влияние термокапиллярного эффекта на приповерхностное течение расплава. Заданному перепаду температуры между ФК и стенками тигля соответствует пара чисел Грасгофа Gg и Марангони Ma . В режимах тепловой гравитационно-капиллярной конвекции нагретый расплав натекает на кромки ФК и кристалл растет с сильно выпуклой в расплав формой ФК [2 - 5]. Для управления радиальными распределениями локальных тепловых потоков и формой ФК используется подбор скорости вращения кристалла [2 - 5]. В данной системе реализуются режимы смешанной конвекции с пространственным разделением зон преобладающего влияния сил плавучести и центробежных. Под вращающимся ФК возникает восходящий поток расплава и его радиальное растекание к кромке ФК. Одним из критериев подбора оптимального режима является положение границы столкновения вынужденного потока расплава из-под вращающегося ФК и свободноконвективного потока от стенок тигля к ФК [2 - 5]. От относительной роли сил плавучести и центробежных существенно зависят пространственная форма и интенсивность течения, и локальный теплообмен на ФК. Что и определяет форму ФК. В предшествующих работах исследования были проведены в ограниченных диапазонах относительных высот слоя расплава H/R_T .

В данной работе в зависимости от H/R_T исследована эволюция пространственной формы течения расплава гептадекана с числом Прандтля $Pr = 40.4$ при отношении радиусов тигля и кристалла $R_T/R_K = 1.94$, при фиксированной скорости вращения кристалла, соответствующей значению числа Рейнольдса $Re = 95$. При заданных значениях $Gr = 1214$, $Ma = 2932$ граница столкновения потоков находится вблизи кромки ФК. Численно методом конечных разностей исследован конвективный теплообмен в диапазоне $0.1 \leq H/R_T \leq 2.0$ с шагом 0.1. Результаты сопоставлены с данными экспериментов.

Экспериментальные исследования выполнены в диапазоне $0.35 \leq H/R_T \leq 1.75$ при числах Gr , Ma и Re , от соответствующих подавляющему влиянию сил плавучести и термокапиллярного эффекта до практически режимов вынужденной конвекции. Сочетая физическое и численное моделирование, найдены режимы с наиболее равномерным распределением локального теплового потока на фронте кристаллизации, соответствующие плоским формам ФК. Число Прандтля гептадекана соответствует расплавам оксидных и щелочно-галлоидных кристаллов. Поэтому результаты исследований гидродинамики, полученные в режимах однофазной конвекции и при кристаллизации практически адекватны реальным технологическим условиям.

Список литературы:

1. Иванникова Н.В., Шлегель В.Н., Васильев Я.В. Оптимизация скорости кристаллизации при росте кристаллов $Bi_4Ge_3O_{12}$ низкоградиентным методом Чохральского // Кристаллография. 2014. Т. 59. № 4. С. 676 – 680.
2. Бердников В.С., Винокуров В.В., Панченко В.И., Соловьев С.В. Теплообмен в классическом методе Чохральского // ИФЖ. 2001. Т. 74. № 4. С. 122–127.
3. Бердников В.С., Винокуров В.А., Винокуров В.В., Гапонов В.А. Влияние режимов конвективного теплообмена на форму фронта кристаллизации в системе тигель-расплав-кристалл в методе Чохральского // Тепловые процессы в технике. 2011. Т. 3. № 4. С. 177-186.
4. Berdnikov Vladimir, Anatoly Prostomolotov, Nataliya Verezub and Victor Vinokurov. Heptadecane and gallium crystallization in hydrodynamic Czochralski model // Journal of Materials Science and Engineering. 2016. A5 (9–10). P 351 – 360.
5. Бердников В.С., Винокуров В.А., Винокуров В.В. Влияние нестационарных режимов свободной и смешанной конвекции расплавов на теплообмен и формы фронтов кристаллизации в методе Чохральского // Известия Российской академии наук. Серия Физическая. 2017. Т. 81, № 10. С. 1395–1402.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (Код темы: 0257-2021-0003, Номер гос. рег. 121031800213-0)

УДК 621.9

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА НА ДИСПЕРСИЮ ПРИМЕСИ В ГОРОДСКОМ КАНЬОНЕ

Васнёв И.Р., Федорова Н.Н.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, Институтская, 4/1

Городские каньоны – это распространенная конфигурация городской застройки, представляющая собой два ряда высоких зданий, расположенных вдоль дороги. Структура аэродинамического течения способствует накоплению внутри каньона различных примесей, например от автотранспорта [1, 2]. На распределение концентраций примеси влияют множество факторов, среди которых важную роль играют температурные условия на стенках каньона и разница температур внешнего течения и примеси, которые создают дополнительные эффекты плавучести [3]. Применительно к условиям северных городов необходимо исследовать случай горячих выбросов в холодный внешний поток при различных температурах стенок.

Наряду с экспериментальными и полевыми исследованиями в задачах городской аэродинамики и экологии активно используют методы математического моделирования с привлечением моделей разной степени сложности. Наиболее затратные с вычислительной точки зрения микроклиматические модели основаны на решении трехмерных уравнений Навье-Стокса с учетом эффектов массо- и теплообмена [4].

В работе представлены результаты моделирования распространения примеси от линейного источника в городском каньоне. Расчеты проведены в Ansys Fluent на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, дополненных $k-\varepsilon$ realizable моделью турбулентности. Расчеты выполнены в условиях экспериментов [5] для городского каньона глубиной $H = 0.12$ м и шириной $W = H$. Изучена эмиссия смеси SF_6 и воздуха из двух линейных источников, расположенных на дне каньона. Скорость набегающего потока направлена по нормали к оси каньона. Описание геометрии, граничных условий и методики решения приведено в [6]. Там же приведены результаты валидации численной модели на экспериментальных данных [5] и исследовано влияние зеленых зон на концентрации примесей на стенках каньона. Целью данной работы является изучение влияния температурных факторов (температуры примеси и тепловых условий на стенках) на дисперсию примеси.

Процессы переноса внутри каньона и массообмен с внешним течением контролируются крупными вихревыми структурами, формирующимися внутри каньона. На рис. 1 показаны линии тока, полученные в изотермическом случае. Линии тока раскрашены с безразмерной величиной концентрации SF_6

$$C^+ = C \cdot U_H \cdot H / Q,$$

где C – вычисленная молярная концентрация, H – глубина каньона, U_H – скорость набегающего потока на высоте H , Q – интенсивность источника примеси на единицу длины. Рисунок показывает, что самые высокие концентрации примеси наблюдаются в центре каньона вблизи стенки здания А, где сходятся линии

тока от двух симметричных вихрей. Ненулевые концентрации примеси наблюдаются вблизи верхней и боковых поверхностей здания А, а унос примеси во внешний поток происходит через верхнюю границу.

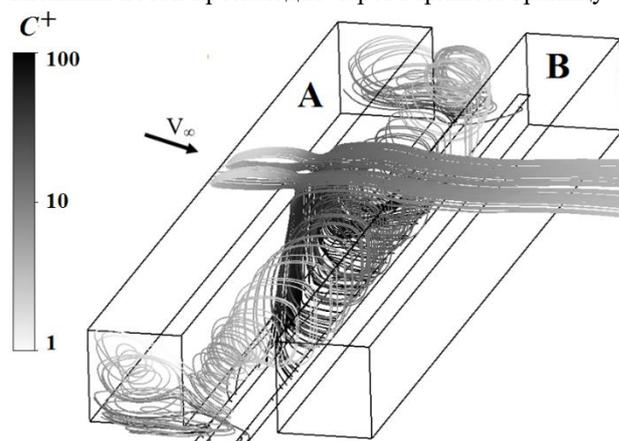


Рис. 1. Линии тока в изотермическом случае.

Далее численно изучены неізотермические случаи с изменением температур основного потока и источника примеси, а также тепловых условий на стенках. Рисунок 2 показывает, что для «горячего» источника примеси, температура которого превышает температуру основного потока на 50 градусов, концентрации SF_6 в центре стенки здания А повышается на 3-5%.

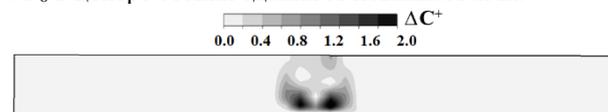


Рис. 2. Избыточная концентрация примеси на стенке здания А для «горячего» источника.

Список литературы:

1. Xian-Xiang Li, Chun-Ho Liu, Dennis Y.C. Leung, K.M. Lam Recent progress in CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyons // Atmos. Environ. 2006. Vol 40. P. 5640-5658.
2. Buccolieri R., Carlo O.S., Rivas E., Santiago J.L., Salizzoni P., Sidiqui M. S. Obstacles influence on existing urban canyon ventilation and air pollutant concentration: A review of potential measures // Building and Environment. 2022. Vol. 214. P. 108905.
3. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках: монография/ колл. авторов; под редакцией В.И. Терехова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 247 с.
4. Vardoulakis S., Fisher B.E.A., Pericleous K., Gonzales-Flesca N. Modelling air quality in street canyons: a review// Atmospheric Environment. 2003. Vol 37. P. 155-182.
5. Электронный источник: www.codasc.de
6. Fedorova N.N., Valger S.A. Study of gas emission transfer processes in the city canyon based on numerical simulation data // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2351 No. 1. P. 030060.

Работа в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект № 121030500163-4)

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ГАЗА В НАГРЕВАЕМОЙ 7-МИ СТЕРЖНЕВОЙ СБОРКЕ С ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ ВСТАВКАМИ

Витовский О.В., Макаров М.С., Лебеда Л.С., Наумкин В.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В работе приведены результаты исследования теплообмена и перепада давления при течении воздуха в пространстве, образованном плотной упаковкой 7-ми нагреваемых труб. Для фиксации труб использованы 8 дистанционирующих решеток, равномерно распределенных по длине сборки, и продольные вытеснители для обеспечения равномерного поля расходов газа во внутренних квазитреугольных и периферийных каналах сборки.

Для проведения экспериментов изготовлен рабочий участок, содержащий сборку тонкостенных труб с внешним диаметром $D = 12,85$ мм и длиной 1084 мм. Толщина стенок $\delta = 0,5$ мм. Трубы изготовлены из нержавеющей стали, что позволило использовать электрический ток для их нагрева при постоянной плотности теплового потока от стенок к газу. Для фиксации труб использованы дистанционирующие решетки, совмещенные с продольными вытеснителями в виде стаканов из термостойкого UV-отверждаемого пластика (рис. 1).

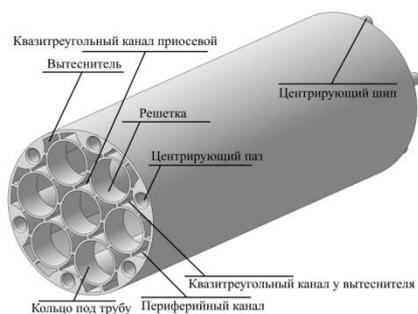


Рис. 1. Дистанционирующие решетки в стакане с вытеснителями, изготовленные с помощью SLA 3D печати.

Решетки шириной 10 мм расположены на расстояниях 0, 210, 354, 498, 642, 786, 930 и 1074 мм от начала сборки. Стенки решетки имеют толщину 0,95 мм. Реализовано равномерное поле расходов газа в приосевых и периферийных каналах. Гидравлический диаметр всех каналов вне дистанционирующих решеток $d_h = 5,4$ мм, а внутри решетки 3,03 мм. Измерение распределения температуры стенки по длине нагреваемых центральной и одной из периферийных труб производилось с помощью подвижных термопарных зондов с 4 медь-константовыми термопарами диаметром 90 мкм. Рабочий участок размещался в замкнутом газовом контуре, в котором циркуляция газа обеспечивалась компрессором.

Результаты измерения температуры стенки центральной (сплошная линия) и периферийной (пунктир) трубы для числа $Re = 8926$ приведены на рис. 2. Штрихпунктирная линия показывает изменение температуры газа от входа в рабочий участок к выходу. Вертикальными штриховыми линиями обозначено

положение дистанционирующих решеток. Наблюдается периодический рост температуры стенки трубы при приближении к дистанционирующей решетке и снижение температуры за ней. Такое поведение температуры стенки объясняется тем, что проходное сечение каналов в дистанционирующей решетке в 3,17 раз меньше, чем проходное сечение межтрубного канала. В потоке газа формируются области торможения перед решеткой и области существенного ускорения внутри решетки с формированием отрывной зоны за ней.

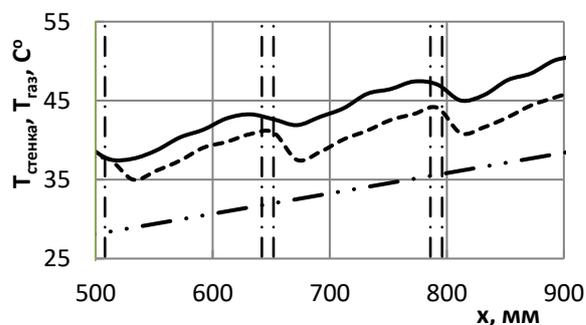


Рис. 2. Распределение температуры стенок (центральной и периферийной) труб и газа по длине сборки при $Re=8926$.

Зависимость $Nu=f(Re, Pr)$, полученная в экспериментах, показана на рис. 3. Увеличение коэффициента теплообмена в 1,4 – 1,6 раз по сравнению с гладким круглым каналом объясняется тем, что решетки, обеспечивающие фиксацию нагреваемых труб в сборке, приводят к периодическому формированию ламинарно-турбулентного перехода и ограниченному росту пограничного слоя в канале с образованием вихревых структур за решеткой, на что обращено внимание в работе [1].

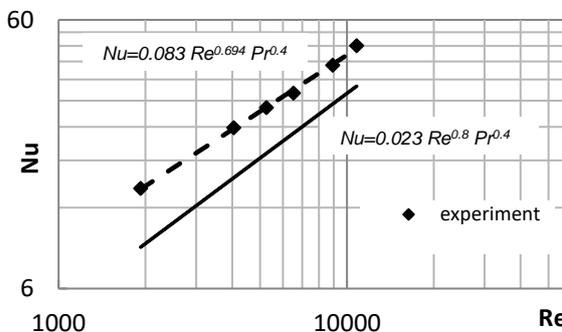


Рис. 3. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса.

Список литературы:

1. Terekhov V.I., Yarygina N.I., Zhdanov R.F. Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 4535–4551.

УДК 536.248.2

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, РАСХОДА ЖИДКОСТИ И РАССТОЯНИЯ ДО НАГРЕВАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СПРЕЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Владыко И.В.^{1,2}, Миськив Н.Б.^{1,2}, Назаров А.Д.^{1,2}, Суртаев А.С.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Спрейное охлаждение — это высокоэффективный метод охлаждения, который находит применение во множестве отраслей, сталкивающихся с высокими тепловыми потоками, включая электронику, аэрокосмическую промышленность, металлургию и биомедицину [1]. Эффективность спрейного охлаждения зависит от многих факторов, таких как расход жидкости, плотность потока капель, скорость и размер капель, тепловой поток и другие. Данное экспериментальное исследование посвящено изучению влияния расстояния между форсункой и поверхностью нагревателя на эффективность теплоотдачи в режиме без кипения, а также изучению распределения локальной температуры поверхности во время спрейного охлаждения.

Эксперименты проводились с использованием однофазных форсунок серии DA SprayTech в диапазоне расходов от 11,0 до 25,3 см³/с и расстояний между форсункой и поверхностью 2-35 мм, а также двухфазной форсункой BKT-SS4230 с расходами от 1,5 до 4,0 см³/с и расстояниями 40-120 мм при тепловых потоках до 6,9 МВт/м². В качестве импактной поверхности была использована кремниевая подложка с ИТО-нагревателем. Поле температур поверхности измерялось с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры. Дистиллированная вода при различных температурах была использована в качестве охлаждающей жидкости. Подробное описание экспериментальной установки представлено в [2].

На основе ИК-изображений была изучена неравномерность профиля температуры по поверхности нагревателя (см. рис. 1). Показано, что температура в центре снижается с уменьшением расстояния, а в периферийной зоне повышается, что приводит к повышению степени неравномерности температуры. Например, при плотности теплового потока $q = 5$ МВт/м² разница температур между центральной и периферийной областями нагревателя для DA форсунки при $L=7$ мм может достигать 39 °С, в то время как разница температур при $L=15$ мм не превышает 18 °С. Такая неравномерность является распространенным явлением и возникает из-за неравномерного распределения скоростей и размеров капель в потоке, которые зависят от типа форсунок. Кроме того, результаты показывают, что коэффициент теплопередачи слабо зависит от теплового потока и значительно — от расстояния от форсунки до поверхности в режиме без кипения. Было показано, что существует оптимальное расстояние, при котором достигается наибольший средний коэффициент теплоотдачи, который составил

121,6 кВт/м²К для однофазной форсунки и 77,4 кВт/м²К двухфазной.

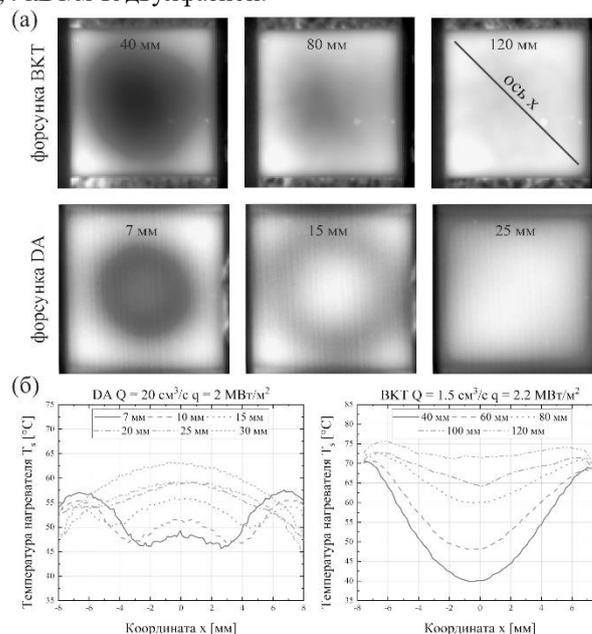


Рис. 1. (а) Термограммы поверхности нагревателя при спрейном охлаждении для различных форсунок и на различных расстояниях; (б) Профили температуры поверхности вдоль диагонали нагревателя.

Таким образом, результаты ИК-съёмки показывают существенную неравномерность температуры, которая сильно зависит от расстояния от форсунки до поверхности. Средний коэффициент теплоотдачи слабо зависит от теплового потока в режиме однофазного теплообмена и в первую очередь определяется значением расстояния для исследуемых режимов. Максимально достижимые коэффициенты теплоотдачи для однофазной и двухфазной форсунок различаются на 36,3%, хотя расходы — в 5 раза. Полученные результаты будут полезны для дальнейших исследований и приложений в области спрейного охлаждения.

Список литературы:

- Zhang T. et al. Advanced Study of Spray Cooling: From Theories to Applications. *Energies* 2022, 15, 9219
- Serdyukov V. et al. The simultaneous analysis of droplets' impacts and heat transfer during water spray cooling using a transparent heater. *Water* 2021, 13(19), 2730.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00581)

УДК 532.574, 004.852

РЕКОНСТРУКЦИЯ МГНОВЕННОГО ПОЛЯ СКОРОСТИ ПО ЛОКАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ТЕРМОАНЕМОМЕТРОМ И ПРЕДЫДУЩИМ PIV ИЗМЕРЕНИЯМ**Гобызов О.А., Пантелеев С.А., Токарев М.П.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В последние годы активно стали использоваться методы машинного обучения для решения задач оптимального управления течениями, в том числе и в сдвиговых течениях, такие как следы и струи [1-2]. В монографии [3] представлен целый ряд экспериментальных задач гидромеханики и активного управления потоком, решаемых с использованием современных подходов, использующих машинное обучение

При этом часто задачи управления течением являются чрезвычайно требовательной с точки зрения регистрирующей аппаратуры и вычислительных мощностей. Для регистрации наиболее полной информации о состоянии регулируемой системы требуется информация об изменении полей характеристик, например, таких как скорость, давление и температура в реальном времени. Снизить требования к оборудованию могут помочь методы compressive sensing, позволяющие восстанавливать полный сигнал по ограниченному объёму локальных наблюдений [4] и предварительной информацией о динамике системы. Также такие методы в некоторых случаях позволяют обойтись без дорогостоящих высокоскоростных камер регистрирующих пространственные распределения величин за счет сбора информации о динамике потока с медленных систем регистрации.

В настоящей работе было проведено испытание восстановления мгновенного поля скорости на реальных точечных измерениях термоанемометром и сравнение полученных данных с данными, полученными при помощи скоростного PIV метода в турбулентном струйном потоке, натекающем на плоскую преграду. Рассматривалась возможность уменьшения количества точечных датчиков с применением алгоритмов восстановления мгновенного поля скорости с приемлемым ростом погрешности измерений. На этапе обучения модели на вход подавались временные последовательности с точечного датчика.

В экспериментах в качестве точечного датчика использовался одноточечный волоконный термоанемометрический датчик (СТА). В экспериментах зонд термоанемометра размещался вблизи импактной поверхности в области струйного пограничного слоя. Точка расположения зонда находилась в области максимума пульсаций скорости потока, и была выбрана в предположении, что величина скорости в этой области максимально скоррелирована со структурой течения.

Для каждого поля PIV было получено соответствующее ему значение скорости, зарегистрированное СТА. В ходе подготовки данных для нейронной сети данные нормировались таким образом, чтобы пульсации скорости как для PIV, так и для СТА, находились

в диапазоне от 0 до 1. Для обучения на вход сети подавались временные последовательности значений скорости длиной от 198 измерений до 1 измерения (соответствующего моменту регистрации реконструируемого поля скорости).

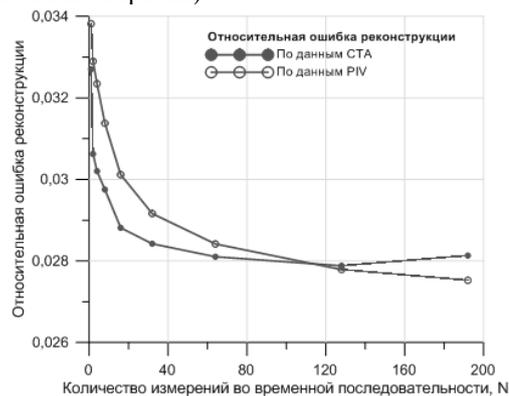


Рис. 1. Точность реконструкции в зависимости от количества используемых локальных измерений

На рис.1 видно, что на основе 128-и измерений декодер реконструирует картину, по своей структуре близкую к измеренной. В реконструкции на основе 32-х измерений ошибка реконструкции возрастает, уже наблюдается потеря части информации о крупномасштабной структуре течения. Реконструкция на основе 2-х измерений представляет собой картину, близкую к фазово-осреднённой.

Установлено, что использование малого числа датчиков (в пределе – одиночного датчика) для реконструкции структуры течения малооправдано, однако если течение содержит существенную периодическую компоненту, использование предыстории измерений способно в значительной мере компенсировать малое число датчиков и повысить качество реконструкции.

Список литературы:

- Gautier N. et al. Closed-loop separation control using machine learning // Journal of Fluid Mechanics. – 2015. – Т. 770. – С. 442-457.
- Debien A. et al. Closed-loop separation control over a sharp edge ramp using genetic programming // Experiments in fluids. – 2016. – Т. 57. – №. 3. – С. 40.
- Duriez T., Brunton S. L., Noack B. R. Machine learning control-taming nonlinear dynamics and turbulence. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. 2017. P. 221.
- Donoho D. L. Compressed sensing // IEEE Transactions on information theory. – 2006. – Т. 52. – №. 4. – С. 1289-1306.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 53.043

ИЗМЕРЕНИЕ ОСЕВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТРУБАХ РАНКА КРУГЛОГО И КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ.

Гордиенко М.Р., Кабардин И.К., Какаулин С.В., Правдина М.Х., Полякова В.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Данная работа продолжает серию работ по исследованию эффекта Ранка-Хилша. Данный эффект, открытый в 1933 году до сих пор не имеет общепризнанного научного обоснования. Это связано с тем, что труба Ранка чрезвычайно сложный объект исследования, как численного, так и экспериментального. Течение в ней является высокотурбулентным и сильнозакрученным. Также в потоке имеются и крупномасштабные структуры, которые трудно диагностировать и численно посчитать. Датчики, вносимые в поток, могут нарушать его изменяя показания терморазделения.

Цель данной работы – провести подробные измерения температуры на оси трубы. В поток на оси трубы помещено множество термопар, расположенных в трубочке. Также из-за того, что данная трубочка будет нарушать поток необходимо сравнить показания температуры и расхода на концах трубы Ранка с присутствием трубочки и без. Измерения проводились для труб ранка с квадратным и круглым поперечным сечением.

В наших работах использовалась труба Ранка квадратного поперечного сечения со стороной квадрата 34 мм. Такая труба используется для удобства оптической диагностики с помощью бесконтактных методов: лазерная доплеровская анемометрия, трассерная визуализация, визуализация с помощью скоростной камеры. Поэтому нам важно проводить измерения на этой трубе, потому, так как имеется обширная база экспериментальных данных, полученных на этой трубе. Также измерения проведены для трубы Ранка с круглым поперечным сечением. Диаметр круглой трубы 34 мм.

Измерения температуры в трубе Ранка проходят в рамках концепции, выдвинутой нами в более ранних работах. В работе [1] течение в вихревой трубе с квадратным поперечным сечением было впервые проанализировано в рамках концепции кризиса течения во вращательно-поступательном потоке. В таком потоке пристенная струя, которая направляется к «горячему» выходу, граничит с циркуляционной зоной, представляющей собой тороидальный вихрь [2-4]. Оказалось, что заметный рост температуры вдоль пристенной струи происходит в области, где наблюдается кризис течения: отношение продольной скорости на границе пристенной струи к критической скорости «С» колеблется относительно единичного значения. Критиче-

ская скорость – это скорость распространения длинных волн на границе пристенной струи с циркуляционной зоной [5-7].

В работе [8] были представлены и проанализированы новые подробные результаты измерений кинематических характеристик кризисного течения, в том числе пульсаций скорости. Выявлены признаки наличия гидравлического прыжка вблизи входа закрученного потока в рабочий канал вихревой трубы.

Подробные измерения температуры на стенке канала и на оси необходимы для точной оценки изменения градиента температуры для наших труб. Данные по температуры на трубе квадратного поперечного сечения будут соотноситься с ранее полученными данными с помощью лазерной доплеровской анемометрии.

Полученные экспериментальные данные по температурам помогут продвинуться в рамках выдвинутой концепции о природе нагрева периферийного потока в трубе Ранка.

Список литературы:

1. Правдина М.Х., Кабардин И.К., Полякова В.И., Куликов Д.В., Меледин В.Г., Павлов В.А., Гордиенко М.Р., Яворский Н.И. Гидравлическая неустойчивость потока в трубе Ранка// ПМТФ. 2020. Т. 61. № 3. С. 82-89.
2. Ahlborn B., Groves S. Secondary flow in a vortex tube // Fluid Dyn. Res. 1997. Vol. 21. No. 2. P. 73-86.
3. Ахметов Д. Г., Ахметов Т.Д., Павлов В.А. Структура потока в вихревой трубе Ранка-Хилша// Доклады академии наук, 2018. Т. 480. № 4. С. 422-425.
4. Akhmetov D.G., Akhmetov T.D. Flow structure and mechanism of heat transfer in a Ranque–Hilsch vortex tube// Experimental Thermal and Fluid Sci. 2020. Vol. 113. P. 110024
5. Bendjamine T.B., Barnard B.J.S. A study of the motion of a cavity of a rotating liquid// J. Fluid Mech. 1964. Vol. 19. P. 193–209.
6. Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. М.: Машиностроение. 1968. С. 496.
7. Новиков И.И., Скобелкин В.И., Абрамович Г.Н., Клячко Л.А. Закономерность расхода жидкости в закрученном потоке (эффект максимального расхода закрученного потока жидкости)// Открытие № 389 внесено в Гос. реестр открытий 18.10.1990 г. по заявке № ОТ-11080 от 27.02.1985. С. 1–10.
8. Кабардин И.К. Экспериментальное исследование кризиса течения в вихревой трубе Ранка-Хилша методом ЛДА// Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т.29. № 5. С. 709-717.

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН

УДК 62-144.3

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПОДВОДЯЩЕГО КАНАЛА НА ГАЗОДИНАМИКУ И ТЕПЛОБМЕН СТАЦИОНАРНОГО ПОТОКА ГАЗА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ В ЦИЛИНДР (ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОРШНЕВОМУ ДВИГАТЕЛЮ)

Давыдов Д.А., Красильников Д.Н., Лаптев А.Д., Плотников Л.В., Следнев В.А., Шурупов В.А.

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) остаются востребованными преобразователями энергии для многих отраслей промышленности. Поэтому совершенствование параметров рабочего цикла и конструкции основных систем ДВС остается актуальной задачей для науки и технологий. Один из эффективных способов улучшения удельных показателей двигателя и его КПД заключается в доводке конструкции впускной системы [1].

Впускная система поршневого ДВС состоит из следующих основных элементов: впускной коллектор, подводящий канал в головке блока, тарельчатый клапан. В данной работе на основе экспериментальных опытов осуществлялась оценка влияния формы поперечного сечения подводящего канала на газодинамику и теплообмен стационарных потоков при истечении воздуха в цилиндр. Гипотеза исследования состояла в изменении газодинамических условий во впускной системе путем поперечного профилирования каналов. Известно, что в углах квадратных и треугольных труб образуются вихревые течения, которые заметно меняют газодинамику и теплообмен [2]. В данном случае использовались каналы с круглым (диаметр 32 мм), квадратным (сторона 32 мм) и треугольным (55 мм) поперечными сечениями. Воздух продувался через впускную систему и цилиндр в стационарных условиях со скоростью от 5 до 85 м/с, температуре 20-22 °С и атмосферном давлении.

Для определения средней скорости потока воздуха и локального коэффициента теплоотдачи использовался метод тепловой анемометрии (термоанемометр постоянной температуры и тепловой датчик). Подробнее см. [3]. Для получения структуры потока в цилиндре двигателя применялся метод тепловизуализирующей съемки (тепловизор и сетка). Подробнее см. [4].

Изменение степени турбулентности потока Tu во впускной системе с разными каналами можно проследить по рис. 1.

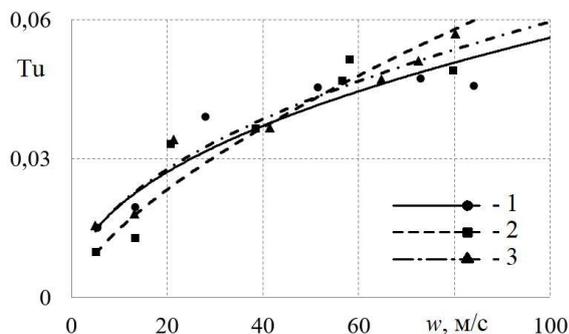


Рис. 1. Зависимости степени турбулентности потока Tu от скорости потока w во впускной системе двигателя с каналами разных форм поперечного сечения: 1 – круг; 2 – квадрат; 3 – треугольник

Установлено, что значения Tu изменяются в диапазоне $\pm 15\%$ при использовании различных конструкций подводящих каналов во впускной системе.

Влияние конструкции канала во впускной системе на уровень теплообмена показано на рис. 2.

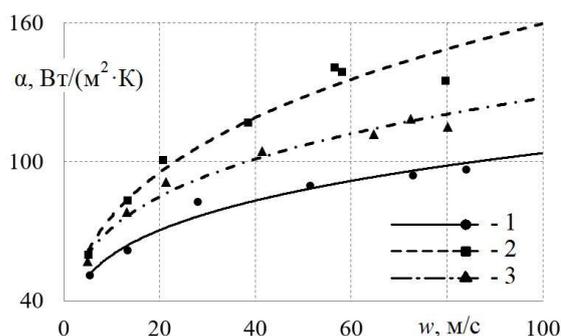


Рис. 2. Зависимости локального коэффициента теплоотдачи a от скорости потока w во впускной системе с каналами разных форм поперечного сечения: 1 – круг; 2 – квадрат; 3 – треугольник

Выявлено, что применение квадратного канала вызывает рост коэффициента теплоотдачи во впускной системе на 15-30 %. Использование треугольного канала также приводит к интенсификации теплообмена на 10-20 % по сравнению с базовой системой впуска.

Таким образом, данное исследование показало:

- степень турбулентности потока воздуха во впускной системе изменяется в диапазоне $\pm 15\%$ при использовании подводящих каналов с разными формами поперечного сечения;
- имеет место интенсификация локального коэффициента теплоотдачи во впускной системе с профилированными каналами в головке блока в диапазоне от 10 до 30 % по сравнению с базовой конструкцией;
- конфигурация подводящего канала оказывает существенное влияние на структуру потока в цилиндре.

Список литературы:

1. Плотников Л.В. Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 204 с.
2. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Москва: Атомиздат, 1979. 416 с.
3. Plotnikov L.V. Unsteady gas dynamics and local heat transfer of pulsating flows in profiled channels mainly to the intake system of a reciprocating engine // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 195. Article number 123144.
4. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows Instruments and experimental techniques. 2004. Vol. 4. P. 545-546.

Работа выполнена при поддержке РФФ в рамках научного проекта 23-29-00022

УДК 661.961.621

УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КОНИЧЕСКОМ ДИФфуЗОРЕ ПРИ СОПЛОВОЙ ПОДАЧЕ ВОЗДУХА

Давыдов Д.А., Красильников Д.Н., Медведев В.А., Плотников Л.В., Смирных М.Д.

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Вертикальные конические диффузоры используются в различных технических и технологических устройствах (теплообменные аппараты, сушилки, устройства для получения синтез-газа, печи, химические реакторы и т.д.) для трансфера рабочей среды с определенными параметрами [1]. Известно, что начальные газодинамические условия (давление, степень турбулентности, поле скоростей) во многом определяют эффективность и производительность диффузора [2, 3]. Поэтому поиск способов управления газодинамикой потоков в вертикальных диффузорах остается актуальной задачей.

В данном случае диффузор состоял из 3-х частей: цилиндр (высота 100 мм, диаметр 82 мм), расширяющийся конус (соотношение диаметров 1:1,64) и основание (диаметр 50 мм) с четырьмя трубками для подачи воздуха. Исследовалась подача воздуха через трубки с поперечными сечениями в форме круга, квадрата и треугольника. Известно, что форма поперечного сечения трубопровода оказывает существенное влияние на газодинамику и теплообмен [4]. Длина всех трубок составляла 100 мм, диаметр круглой трубки составлял 5 мм, сторона квадрата – 5 мм, сторона треугольника – 8,6 мм. Геометрия трубок выбрана исходя из равенства эквивалентного гидравлического диаметра. Исследования проводились для средних скоростей потока воздуха w от 4 до 12 м/с. Контрольная скорость w определялась в начале цилиндрической части с помощью термоанемометра постоянной температуры в центре цилиндра.

Изучение структуры потока в диффузоре осуществлялось на основе метода тепловизирующей съемки, который заключается в размещении в потоке визуализирующей сетки из полимерных нитей. Физический принцип этого метода основан на анализе полей дисперсии температуры, получаемых с помощью тепловизионной съемки [5]. Соответственно, для получения термограмм необходимо было предварительно нагревать воздух до температуры 60-70 °С. Полученные термограммы представлены на рис. 1.

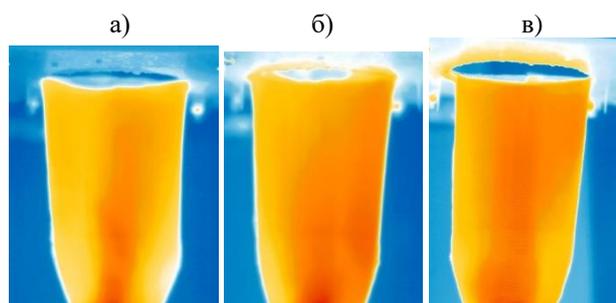


Рис. 1. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре для средней скорости потока $w = 8,2$ м/с при подаче через сопла с разными поперечными сечениями: а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Установлено, что при подаче воздуха через круглую трубку имеет место фактически центральное течение в цилиндрической части диффузора. При этом, в углах конусной части наблюдаются застойные зоны. Использование квадратных трубок для подачи воздуха в диффузор вызывает быстрый «развал» струи фактически у основания. При этом, в углах конуса отсутствуют застойные зоны. Применение треугольных трубок приводит к «широкому» центральному течению по сравнению с круглыми соплами. При этом, также отсутствуют застойные зоны в углах конуса. Следует отметить, что аналогичные результаты были получены для всех исследуемых скоростей потока воздуха. Соответственно, можно предположить, что за счет изменения конфигурации подающих сопел можно управлять структурой потока в вертикальном диффузоре. Для уточнения данных необходимо провести подробные исследования полей скоростей и структуры потока с помощью более точных оптических методов (PIV и SIV).

Таким образом, на основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

- форма поперечного сечения подающих трубок (сопел) оказывает существенное влияние на структуру потока в вертикальном диффузоре и может рассматриваться как способ управления аэродинамическими характеристиками;
- полученные данные расширяют базу знаний об особенностях газодинамики в вертикальных конических диффузорах и могут быть использованы для верификации математических моделей и уточнения инженерных расчетов.

Список литературы:

1. Japikse D., Baines N.C. Diffuser Design Technology. Norwich: Concepts ETI, 1998. 524 p.
2. Klein A. Effects of inlet conditions on conical-diffuser performance // Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. 1981. Vol. 103 (2). P. 250-257.
3. Lee J., Jang S.J., Sung H.J. Direct numerical simulations of turbulent flow in a conical diffuser // Journal of Turbulence. 2012. Vol. 13. P. 1-29.
4. Plotnikov L.V. Unsteady gas dynamics and local heat transfer of pulsating flows in profiled channels mainly to the intake system of a reciprocating engine // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 195. Article number 123144.
5. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows Instruments and experimental techniques. 2004. Vol. 4. P. 545-546.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства "Приоритет-2030"

УДК 621.039.58

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ С ПОМОЩЬЮ КОДА HYDRA-IBRAE/LM**Ильясова О.Х., Алипченков В.М., Мосунова Н.А.**ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52

В соответствии с энергетической стратегией нашей страны в настоящее время проводится активная работа по проектированию и созданию инновационных атомных электростанций с реакторными установками (РУ) с жидкометаллическими теплоносителями, работающими в замкнутом ядерном топливном цикле. Решение поставленной задачи позволит снять ограничение на топливные ресурсы за счет воспроизводства топлива и обеспечить безопасность на основе принципов естественной безопасности.

Для строительства и ввода в эксплуатацию любой реакторной установки необходимо обосновать ее безопасность. Одним из инструментов, используемых для этого, являются компьютерные коды, которые должны быть верифицированы, валидированы и аттестованы в Ростехнадзоре.

Системный теплогидравлический код HYDRA-IBRAE/LM [1], который разрабатывается в ИБРАЭ РАН, является одним из кодов нового поколения, разработанных в рамках проектного направления «Прорыв» для обоснования реакторных установок со свинцовым, свинцово-висмутовым и натриевым теплоносителями. В основе кода лежит двухжидкостная модель теплогидравлики, в рамках которой решается три одномерных уравнения сохранения (массы, энергии, импульса) для двух фаз: жидкой и газовой. Для дисперсно-кольцевого режима течения в коде реализована трехжидкостная модель, в которой к базовым уравнениям добавляются еще три для дисперсной фазы (капель). Верификация и валидация кода является неотъемлемым этапом его развития. Код HYDRA-IBRAE/LM обладает обширной валидационной базой применительно к жидкометаллическим теплоносителям. Для более физичного моделирования различных ситуаций, которые могут возникнуть при течении жидкометаллического теплоносителя, в коде реализованы специальные модели, корректность которых проверена на ряде экспериментов [2].

Данная работа посвящена полученным в последние два года результатам моделирования с помощью кода HYDRA-IBRAE/LM экспериментов, проведенных в АО «НИКИЭТ» и АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», в которых исследовался теплообмен жидкометаллических теплоносителей в пучках стержней, дистанционируемых с помощью решеток.

Целью экспериментов, проведенных в АО «НИКИЭТ», было исследование теплообмена в сборке при течении свинцового теплоносителя. Были проведены как стационарные, так и динамические эксперименты, в ходе которых менялись начальные температуры и расходы свинца, мощности энерговыделения. Изучалась теплоотдача в макете ТВС, конструктивно подобного натурной ТВС центральной зоны РУ БРЕСТ-ОД-

300 в диапазонах расходов, соответствующих как режимам нормальной эксплуатации, так и нарушения нормальной эксплуатации. Средняя погрешность расчета температуры теплоносителя на выходе из сборки для стационарных экспериментов составила 0,5 К, для динамических – 0,1 К.

Также было проведено моделирование экспериментов, проведенных в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» на стенде 6Б [3]. Первая серия экспериментов была посвящена исследованию теплообмена при течении эвтектики натрий-калий в сборке. Были получены значения температур теплоносителя на выходе из сборки. Погрешность моделирования составила менее 0,1 К. Вторая серия также относилась к изучению теплообмена при течении NaK теплоносителя, но в этом случае с учетом блокировки части сечения сборки. Погрешность полученных значений температур теплоносителя на выходе из сборки составляет 0,6 К. При обработке полученных результатов проводился анализ неопределенностей и чувствительности по методике, приведенной в [4].

Проведенные расчеты показали хорошую точность моделирования теплоотдачи в макетах ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300, полученные данные согласуются с экспериментальными значениями и качественно, и количественно, что свидетельствует о возможности моделирования с помощью кода HYDRA-IBRAE/LM процессов теплообмена при течении жидкометаллических теплоносителей. Проведенный анализ неопределенностей и чувствительности показал, что результаты расчетов наиболее чувствительны к изменению массового расхода теплоносителя, мощности энерговыделения и тепловым потерям.

Список литературы:

1. Alipchenkov V.M., Anfimov A.M., Afremov D.A., Gorbunov V.S., Zeigarnik Yu.A., Kudryavtsev A.V., Osipov S.L., Mosunova N.A., Strizhov V.F., Usov E.V., 2016. Fundamentals, Current State of the Development of, and Prospects for Further Improvement of the New-Generation Thermal-Hydraulic Computational HYDRA-IBRAE/LM Code for Simulation of Fast Reactor Systems. Thermal Engineering, 2, 130-139.
2. Alipchenkov V.M., Grudtsyn Ya.V., Ilyasova O.H., Mosunova N.A., 2022. Simulation of the processes occurring during steam generator tube rupture in the lead cooled reactor unit using HYDRA-IBRAE/LM code. Progress in Nuclear Energy, V. 149, 2022, 104278.
3. Электронный источник, URL: <https://www.ippe.ru/facilities/thermal-physics/heat-hydraulic-liquid-metal/178-6b>.
4. Моисеенко Е.В., Мосунова Н.А., 2018. Методика оценки неопределенностей результатов расчета для задач обоснования безопасности объектов использования атомной энергии // Вопросы радиационной безопасности, №2. С.24–34.

УДК 532.526.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАСАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА СТЕНКЕ В ТРУБАХ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

Кашинский О.Н., Курдюмов А.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Течение в трубах и каналах характеризуется наличием широкого спектра пульсаций скорости. Одной из важнейших гидродинамических характеристик течения является напряжение трения на стенке, пропорциональное градиенту скорости на стенке. Как показывают результаты многочисленных исследований, в развитом турбулентном течении имеются интенсивные пульсации напряжения трения на стенке. Величина относительной интенсивности пульсаций, по данным работ [1, 2] изменяется в диапазоне от 0,32 до 0,40. Все исследования, выполненные ранее, проводились в трубах больших диаметров, больше 30 мм. В цикле работ по исследованию газожидкостных течений [3, 4] отсутствуют данные о поведении пульсаций трения в однофазном потоке. Очень слабо изучено поведение пульсаций трения в трубах малых диаметров.

Задачей настоящей работы являлось экспериментальное исследование пульсационной структуры напряжения трения на стенке в трубах различных диаметров.

Экспериментальная установка представляла замкнутый гидравлический контур, оснащенный системой термостатирования жидкости. Для измерения расхода жидкости использовалась система ротаметров и расходомерных диафрагм, позволяющая изменять расход жидкости в широких пределах. Измерение напряжения трения на стенке производилось электродиффузионным методом [3, 4]. В качестве рабочих участков гидравлического контура использовались трубы с внутренним диаметром D от 4 мм до 32 мм. Во всех рабочих участках вмонтировались электродиффузионные датчики трения. Размер всех датчиков в направлении потока составлял 0,05 мм. Измерения на всех рабочих участках проводились по единой методике с использованием одной и той же измерительной аппаратуры. Калибровка датчиков трения производилась в широком диапазоне расходов жидкости с использованием корреляций Гагена-Пуазейля и Блазиуса для ламинарного и турбулентного течений, соответственно.

В ходе экспериментов на каждом рабочем участке производилась запись реализаций диффузионного тока датчика при различных расходах жидкости. Запись производилась в течение 30 с. Далее производилась линеаризация записей тока с использованием калибровочных зависимостей, после чего вычислялись среднее значение трения на стенке $\bar{\tau}$ и среднеквадратичное значение пульсаций трения τ' и относительных пульсаций трения $\epsilon = \tau' / \bar{\tau}$.

На рисунке 1 приведены зависимости относительных пульсаций трения от числа Рейнольдса для труб различного диаметра. На приведённом графике видно, что в трубах малых диаметров относительные пульсации трения уменьшаются с увеличением числа Рейнольдса.

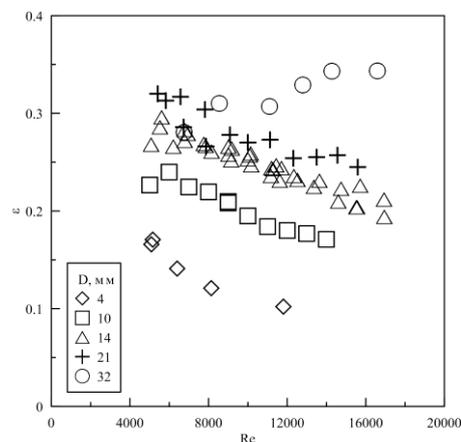


Рис. 1. Зависимость пульсаций от диаметра канала

На рисунке 2 приведена зависимость относительных пульсаций трения от диаметра трубы в развитом турбулентном течении при $Re = 10000$.

Следует отметить, что значения $\epsilon = 0,32 \div 0,36$, полученные ранее в работах [1, 2] для труб большого диаметра, в наших экспериментах реализуются только для рабочего участка с диаметром 32 мм. Для участков с меньшим диаметром значения ϵ в турбулентном режиме течения существенно ниже.

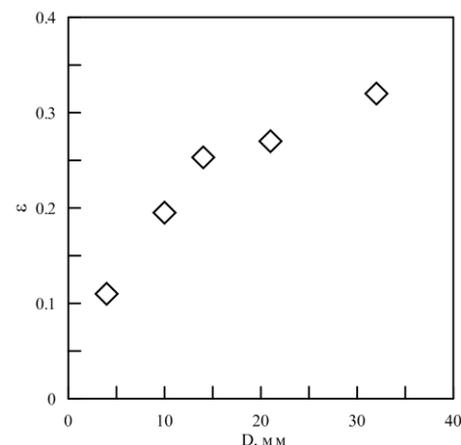


Рис. 2. Зависимость турбулентных пульсаций от Re для труб разного диаметра

Список литературы:

1. Mitchell J.E., Hanratty T.J. J. Fluid Mech 26, 199-221. 1966.
2. Alfredsson P.H., Johansson A.V. Phys. Fluids 31, 1026-1033. 1988.
3. Накоряков В.Е., Кашинский О.Н. Теплофизика и аэромеханика, т. 4, № 2, 115-127. 1997.
4. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Randin V.V., Timkin L.S. J. Fluids Eng. 118, 377-382. 1996.

Работа выполнена в рамках госконтракта с ИТ СО РАН

УДК 004.9

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КАЛИБРОВКИ КАМЕР ДЛЯ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ЧАСТИЦ

Кирчанова Е.Е.^{1,2}, Токарев М.Ю.^{1,2}, Дулин В.М.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Измерение объемного (3D) распределения поля скорости является актуальной задачей при исследовании фундаментальных свойств анизотропных турбулентных течений, таких как струи с закруткой потока [1]. В настоящее время активно развиваются методы 3D визуализации на основе изображений трассерных частиц, зарегистрированных с различных ракурсов. Для обработки изображений используют различные математические подходы. Наиболее часто применяемые методы:

- Трехмерная анемометрия по трекам частиц (3D-PTV) [2], позволяющая отследить местоположение и скорость каждой отдельной частицы для их малой концентрации. Метод основан на вероятностном определении одной и той же частицы в пространстве на паре кадров и восстановлении её трехмерных координат путем триангуляции;
- Томографический метод анемометрии по изображениям частиц PIV (Tomographic PIV) [3], восстанавливающий объемные 3D изображения интенсивности частиц, по которым определяется групповая скорость частиц в перемещаемом по пространству окне опроса;
- Лагранжевый метод анализа траекторий частиц [4] – совокупность первых двух методов в условиях регистрации изображений с высоким временным разрешением. Метод позволяет отслеживать отдельные частицы даже если их траектории пересекаются на проекциях, то есть при высоких концентрациях.

Данная работа посвящена развитию Лагранжевого метода анализа траекторий частиц. У алгоритма есть недостаток: для его работы очень важна точность пространственной калибровки камер, необходимо, чтобы ошибка была минимальна.

Пространственная калибровка камеры – это нахождение ее внутренних и внешних параметров, таких как фокусное расстояние, матрица поворота и матрица сдвига относительно начала координат, а также коэффициенты радиальной и тангенциальной дисторсии.

Для расчета калибровки используются изображения калибровочной «мишени». Большинству алгоритмов калибровки для работы необходимо знать сопоставление между местонахождением маркера в пространстве и на изображении (в пикселях). Затем эта информация используется для нахождения параметров камеры.

Целью данной работы является развитие Лагранжевого метода за счет повышения точности калибровки камер до субпиксельного размера.

Для апробации работы алгоритма был обработан эксперимент со спиральными режимами течения в струях разной степени закрутки [5,6]. Закрученный струйный поток был организован в замкнутом гидродинамическом контуре, который включал резервуар для воды, насос, расходомер и испытательную секцию. Расход контролировался с помощью обратной связи от расходомера к насосу. Сужающее сопло, содержащее сменные лопастные завихрители, создавало закрученный струйный поток.

Поток засеивали частицами полиамида размером 50 мкм, которые имели почти нейтральную плавучесть. Объем измерения $40 \times 40 \times 40 \text{ мм}^3$ был записан четырьмя высокоскоростными КМОП-камерами (Photron FASTCAM SA5) с размером сенсора 1024×1024 . Камеры были оснащены макрообъективами SIGMA AF 105 мм f/2.8 EX DG. Оптическое увеличение в эксперименте составило 0,284 при f-числе, выбранном при $f\# = 16$, что обеспечивало относительно большую глубину резкости (приблизительно 40 мм). Горизонтально выровненные камеры были направлены в центр измерительного объема под разными углами обзора: 39° , 23° , -18° и -31° градус относительно оси z.

В ходе работы были найдены траектории трассерных частиц. Также было произведено сравнение с результатами обработки алгоритмом Томо-PIV.

Список литературы:

1. Xu H. et al. High order Lagrangian velocity statistics in turbulence // Physical review letters. – 2006. – Т. 96. – №. 2. – С. 024503.
2. Virant M., Dracos T. 3D PTV and its application on Lagrangian motion // Measurement science and technology. – 1997. – Т. 8. – №. 12. – С. 1539.
3. Atkinson C., Soria J. An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry // Experiments in Fluids. – 2009. – Т. 47. – №. 4. – С. 553-568.
4. Schanz D., Gesemann S., Schröder A. Shake-The-Box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities // Experiments in fluids. – 2016. – Т. 57. – №. 5. – С. 1-27.
5. Markovich D. M. et al. Helical modes in low-and high-swirl jets measured by tomographic PIV // Journal of Turbulence. – 2016. – Т. 17. – №. 7. – С. 678-698.
6. Alekseenko S.V. et al. Coherent structures in the near-field of swirling turbulent jets: A tomographic PIV study // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2018. – Т. 70. – С. 363-379.

Работа выполнена за счет средств государственного задания в ИТ СО РАН.

УДК 532.68, 536.24

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРЯЖЕННОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ С ПРОДОЛЬНОМ ГРАДИЕНТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ НА НИЖНЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ГРАНИЦЕ

Кислицын С.А., Бердников В.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В теоретических работах, результаты которых обобщены в монографии [1], рассматривалось адвективное течение в бесконечно длинных горизонтальных слоях жидкости с продольным градиентом температуры на нижней жесткой высокотеплопроводной границе слоя и со свободной верхней. На свободной границе слоя жидкости учитывалось влияние термокапиллярного эффекта. В [1] систематизированы так же результаты исследований устойчивости течений. В экспериментальных исследованиях возможна реализация только ограниченного вертикальными стенками фрагмента горизонтального слоя [2, 3]. Существенное отличие ограниченного по длине слоя от классической теоретической постановки задачи состоит в том, что вдоль границ развиваются пограничные слои, имеющие “переднюю кромку”. Поэтому профили температуры и скорости являются функциями продольной координаты. Экспериментальные исследования развития нестационарных пограничных слоев в данных условиях практически нет до настоящего времени. Конвекция в полостях с продольным градиентом температуры является, в частности, моделью технологического процесса выращивания монокристаллов методом горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК) [4, 5]. В методе ГНК сопряженный конвективный теплообмен влияет на формы фронтов кристаллизации, на скорости роста кристаллов и на качество получаемых монокристаллов. Изучать гидродинамику расплавов и измерять распределения температуры в высокотемпературных расплавах практически невозможно. Поэтому основными методами изучения процессов конвективного теплообмена являются физическое и численное моделирование. Аналогичные по физической природе нестационарные течения возникают в тонкостенных авиационных топливных баках в режимах разогрева и охлаждения. Нестационарная тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в баках при наличии свободной границы раздела топлива и газовой среды приводит к неравномерным распределениям локальных тепловых потоков и к дополнительным термическим напряжениям в элементах конструкций. Поэтому необходимы исследования особенностей нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в слоях с продольным градиентом температуры.

Данная работа является продолжением [6] и направлена на дальнейшее изучение сценариев развития конвективного течения и устойчивости пограничного слоя, развивающегося на нижней границе в условиях подавляющего или значительного влияния сил плавучести и термокапиллярного эффекта. Методом конечных элементов проведены численные исследо-

вания нестационарного конвективного течения гептадекана в горизонтальном слое, возникающего после внезапно приложенного продольного градиента температуры на нижней границе. Расчетная область состоит из слоев гептадекана снизу и воздуха сверху. Задача решалась в сопряженной двумерной постановке в декартовых координатах. Решались уравнения свободной конвекции в жидкости и в газе в переменных температура, вихрь и функция тока. Граница раздела жидкость-газ считалась недеформируемой. Длина слоев гептадекана и воздуха $L = 200$ мм, высоты слоев $H_{1,2} = 20$ мм. Продольный градиент температуры задавался за счет внезапного нагрева левой вертикальной стенки и сохранения начальной температуры системы на правой торцевой вертикальной стенке. Считается, что на нижней границе слоя мгновенно устанавливается продольный градиент температуры. Расчеты выполнены с учетом влияния термокапиллярного эффекта при перепадах температуры $\Delta T = 10$ К и 20 К. Показано, что в некоторых интервалах времени возникают два типа неустойчивости. Первый тип – это неустойчивость в подогреваемом пограничном слое, развивающемся на нижней стенке при натекании холодной жидкости на все более нагретые участки стенки. Второй тип вторичных течений возникает на границах встречных потоков в центральной по высоте части слоев жидкости. Результаты представляют интерес с точки зрения анализа развития неустойчивости течений и определения амплитудно-частотных характеристик возмущений в потоке, натекающем на холодную стенку или на фронт кристаллизации в методе горизонтальной направленной кристаллизации [4 – 6].

Список литературы:

1. Устойчивость конвективных течений / Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А., М.: Наука, Глав. Ред. Физ.-Мат. Литературы, 1989. 320 с.
2. Berdnikov V.S., Zabrodin A.G., Markov V.A. Thermogravitational and thermocapillary convection in a Rectangular Cavity // Fluid Mech., Soviet Research. 1986, v.15, N 1. P.118-133.
3. Berdnikov V.S., Zabrodin A.G. Thermal Convection and Instability Mechanisms in Liquid with capillary effects // Russian J. Engineering Thermophys. 1991. V.1, N 3. P.245-257.
4. Бердников В.С., Кислицын С.А., Митин К.А. Численное моделирование процессов роста кристаллов методом горизонтальной направленной кристаллизации из расплавов с различными числами Прандтля // Известия РАН. Серия Физическая, 2017. Т. 81, № 10, С.1389-1394.
5. Тепло- и массоперенос при выращивании монокристаллов направленной кристаллизацией / Багдасаров Х.С., Горяинов Л.А., М.: Физматлит, 2007. 224 с.
6. Kislitsyn S.A., Berdnikov V.S. Numerical studies of the advective flow of heptadecane in a horizontal layer with a longitudinal temperature gradient at the lower boundary // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2119. p.012085.

УДК 621.9

АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ

Кудинов В.А., Трубицын К.В., Котова Е.В., Гаврилова Т.Е.

Самарский государственный технический университет,
443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

При течении жидкости (сжимаемой или несжимаемой) относительно неподвижной стенки возникает динамический пограничный слой.

Математическая постановка задачи при переменной в поперечном направлении вязкости имеет вид [1, 2]

$$\vartheta_x \frac{\partial \vartheta_x}{\partial x} + \vartheta_y \frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu(y) \frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} \right]; \quad (1)$$

$$\partial \vartheta_x / \partial x + \partial \vartheta_y / \partial y = 0; \quad (2)$$

$$\vartheta_x|_{y=0} = 0; \quad (3)$$

$$\vartheta_y|_{y=0} = \vartheta; \quad (4)$$

$$\vartheta_x|_{y=\delta(x)} = 0; \quad (5)$$

$$(\partial \vartheta_x / \partial y)_{y=\delta(x)} = 0, \quad (6)$$

где ϑ_x, ϑ_y – скорости по осям x и y ; x, y – продольная и поперечная координаты; $\nu(y)$ – кинематическая вязкость; $\delta(x)$ – толщина слоя; ϑ – скорость невозмущенного потока.

Осреднение уравнений (1), (2) по переменной y приводит к следующему интегральному уравнению

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\delta(x)} (\vartheta_x - \vartheta) \vartheta_x dy = - \int_0^{\delta(x)} \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu(y) \frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} \right] dy. \quad (7)$$

Найдём решение задачи (1) – (7) в случае, когда вязкость является линейной функцией координаты y

$$\nu(y) = \nu^* (1 - \beta y), \quad (8)$$

где ν^* – кинематическая вязкость при $y = 0$ ($y < 1$); β – коэффициент.

Подставляя (8) в (7), используя безразмерные скорости

$$Q_x = \vartheta_x / \vartheta; \quad Q_y = \vartheta_y / \vartheta, \quad (9)$$

задача (1) – (7), (9) принимает вид

$$Q_x \frac{\partial Q_x}{\partial x} + Q_y \frac{\partial Q_x}{\partial y} = \gamma \left[\beta \frac{\partial Q_x}{\partial y} - (1 - \beta y) \frac{\partial^2 Q_x}{\partial y^2} \right]; \quad (10)$$

$$\partial Q_x / \partial x + \partial Q_y / \partial y = 0; \quad (11)$$

$$Q_x|_{y=0} = 0; \quad (12)$$

$$Q_y|_{y=0} = 0; \quad (13)$$

$$Q_x|_{y=\delta(x)} = 1; \quad (14)$$

$$(\partial Q_x / \partial y)_{y=\delta(x)} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\delta} (Q_x - 1) Q_x dy =$$

$$= \gamma \left[\beta \int_0^{\delta} \frac{\partial Q_x}{\partial y} dy - \int_0^{\delta} (1 - \beta y) \frac{\partial^2 Q_x}{\partial y^2} dy \right]; \quad (16)$$

где $\gamma = \nu^* / \vartheta$.

Решение задачи принимается в виде

$$Q_x(x, \delta) = \sum_{k=1}^n a_k(\delta) \phi_k(y), \quad (17)$$

где $a_k(\delta), (k = \overline{1, n})$ – неизвестные коэффициенты; $\phi_k(y) = y^{2k-1}$ – координатные функции.

Соотношение (17) удовлетворяет условию (12). Коэффициенты $a_k(\delta)$, находятся из условий (14), (15) и некоторых дополнительных условий, задаваемых в точке $y = 0$ и на границе $y = \delta(x)$. Общие формулы для них имеют вид [2]

$$\left(\frac{\partial^i Q_x}{\partial y^i} \right)_{y=0} = 0, \quad (i = 1, 3, 5, \dots), \quad (18)$$

$$\left(\frac{\partial^i Q_x}{\partial y^i} \right)_{y=\delta(x)} = 0, \quad (i = 1, 3, 5, \dots). \quad (19)$$

Для решения задачи в третьем приближении подставим (17) в (14), (15), (18) (при $i = 1$). Относительно неизвестных коэффициентов $a_k(\delta), (k = 1, 2, 3)$ будем иметь систему трёх алгебраических уравнений. После их определения соотношение (17) будет

$$Q_x(x, \delta) = \frac{5}{2} \left(\frac{y}{\delta} \right)^3 - \frac{3}{2} \left(\frac{y}{\delta} \right)^5. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (16), относительно $\delta(x)$ получаем обыкновенное дифференциальное уравнение. Интегрируя это уравнение и подставляя найденное $\delta(x)$ в (20), получаем решение задачи (11) – (16) в третьем приближении. Его анализ позволяет заключить, что изотакхи (линии одинаковых скоростей) вблизи точки $y = 0$ перпендикулярны продольной переменной x . Этот факт можно объяснить высокой вязкостью среды при приближении к точке $y = 0$, препятствующей искривлению изотакх. В связи с чем, скорость по координате y в пределах пограничного слоя практически не изменяется и изменяется лишь по направлению оси x .

Список литературы:

1. Теория пограничного слоя / Шлихтинг Г. М.: Наука, 1969. 742 с.
2. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущихся жидкостях / Кудинов И.В., Кудинов В.А., Еремин А.В., Колесников С.В. Санкт – Петербург: Издательство «Лань». 2015. 208 с.

УДК 621.9

ФОРМИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ РАЗГОННОМ ТЕЧЕНИИ КУЭТТА С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННО – ВРЕМЕННОЙ НЕЛОКАЛЬНОСТИ

Кудинов В.А., Трубицын К.В., Котова Е.В., Стефанюк Е.В., Гаврилова Т.Е.

Самарский государственный технический университет,
443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Изучение разгонных течений (возникающих из состояния покоя) позволяет выполнять исследование формирования пограничного слоя на стенке, которая движется в неподвижной среде [1]. Математическая постановка задачи Куэтта имеет вид

$$\frac{\partial u(y,t)}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u(y,t)}{\partial y^2}; \quad t > 0, 0 \leq y \leq \delta \quad (1)$$

$$u(y,0) = 0; \quad u(0,t) = u_0; \quad u(\delta,t) = 0, \quad (2)$$

где u – скорость; $u_0 = \text{const}$ – скорость движения стенки; y – координата; t – время; δ – расстояние между подвижной и неподвижной стенками; ν – кинематическая вязкость.

В основе вывода уравнений Навье-Стокса лежит закон Ньютона для касательного напряжения

$$\tau = \mu \partial u / \partial y, \quad (3)$$

где τ – касательное напряжение; μ – динамическая вязкость.

Уравнение (1), являясь параболическим, описывает бесконечную скорость переноса импульса, ввиду того что в формуле (3) напряжение мгновенно следует за скоростью деформации. С целью описания переноса импульса с конечной скоростью в работе [2] при выводе уравнения Навье-Стокса используется модифицированная формула закона Ньютона

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \tau_p \frac{\partial \tau}{\partial t} + \mu \tau_p \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial t}, \quad (4)$$

где τ_p – время релаксации.

Используя формулу (4), получено уравнение Навье-Стокса, в котором учитывается пространственно – временная нелокальность

$$\frac{\partial u(y,t)}{\partial t} + \tau_p \frac{\partial^2 u(y,t)}{\partial t^2} = \nu \left[\frac{\partial^2 u(y,t)}{\partial y^2} + \tau_p \frac{\partial^3 u(y,t)}{\partial y^2 \partial t} \right]. \quad (5)$$

Найдем решение симметричной задачи Куэтта в следующей математической постановке

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta(\xi, Fo)}{\partial Fo} + Fo_p \frac{\partial^2 \Theta(\xi, Fo)}{\partial Fo^2} &= \\ &= \frac{\partial^2 \Theta(\xi, Fo)}{\partial \xi^2} + Fo_p \frac{\partial^3 \Theta(\xi, Fo)}{\partial \xi^2 \partial Fo}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Theta(\xi, 0) = 1; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Theta(\xi, 0)}{\partial Fo} = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Theta(0, Fo)}{\partial \xi} = 0; \quad (9)$$

$$\Theta(1, Fo) = 0, \quad (10)$$

где $\Theta = 1 - v$; $\xi = 1 - \eta$; $v = u / u_0$; $\eta = y / \delta$;
 $Fo = \nu t / \delta^2$; $Fo_p = \nu \tau_p / \delta^2$; δ – половина ширины канала.

Точное аналитическое решение задачи (6) – (10) имеет вид

$$\Theta(\xi, Fo) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ [C_{1k} \exp(z_{1k} Fo) + C_{2k} \exp(z_{2k} Fo)] \cos \left(r \frac{\pi}{2} \xi \right) \right\}, \quad (11)$$

где z_{ik}, c_{ik} – собственные числа и константы интегрирования.

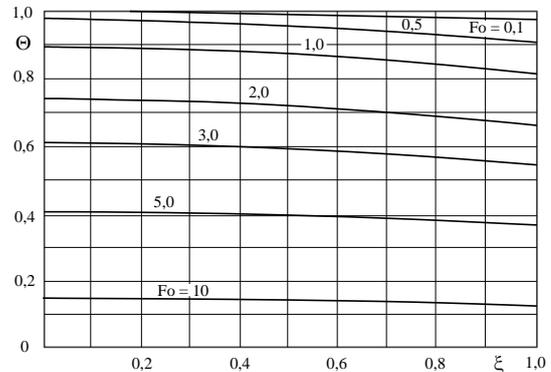


Рис.1. Распределение скорости; $Fo_p = 5$; $n = 10^4$.

Из их анализа расчетов по формуле (11) следует, что при некоторых малых значениях безразмерного коэффициента релаксации Fo_p условие прилипания частиц среды к стенке (граничное условие первого рода (10)) реализуется не мгновенно, а в течение некоторого диапазона времени. С увеличением числа Fo_p , что при заданном τ_p возможно либо с увеличением ν , либо с уменьшением δ , происходит баллистический перенос импульса, при котором граничное условие первого рода принимается лишь по истечении всего времени нестационарного процесса (рис. 1). Понятие пограничного слоя в данном случае теряет смысл, так как он не формируется в течение всего времени нестационарного процесса.

Список литературы:

1. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. М.: Наука, 1969. 472 с.
2. Кудинов В.А., Кудинов И.В. Получение точных аналитических решений гиперболических уравнений движения при разгонном течении Куэтта // Известия АН. Энергетика. 2012. № 2. С. 119-133.

УДК 532.3

МЕТОД ПОГРУЖЕННОЙ ГРАНИЦЫ В ЗАДАЧЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ТЕЛА И ЖИДКОСТИ

Куранakov Д.С., Есипов Д.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Задача моделирования течений вязкой жидкости с погруженными в нее телами сложной геометрии является важной и сложной прикладной задачей. Основными сложностями являются следующие факторы. Во-первых, область течения жидкости не является неизменной, поэтому требуется постоянное отслеживание границ переносимых частиц и менять область течения в соответствии с измененными границами. Во-вторых, для корректного описания переноса частицы требуется высокая точность вычисления сил и моментов сил, действующих на тело со стороны жидкости.

Для решения данных проблем в настоящее время набирает популярность метод погруженной границы [1]. Его основная идея заключается в том, что течение жидкости описывается на неподвижной регулярной эйлеровой сетке, а перемещение погруженных тел – посредством перемещения лагранжевой сетки границ тел. Для описания взаимодействия тел и жидкости на лагранжевой границе вводится поверхностная сила, действующая с одной стороны на погруженное тело, а с другой стороны на жидкость. Величина этой силы подбирается из кинематического условия прилипания жидкости к поверхности погруженного тела.

Для описания течения жидкости мы используем уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости, решаемые с помощью одной из модификаций метода SIMPLE. В данной модификации в итерациях одновременно подбираются поля скорости, давления и силы взаимодействия между частицами и жидкостью. Перемещение и вращение погруженных тел описывается уравнениями Ньютона-Эйлера для твердых недеформируемых тел.

С помощью разработанной модели решены задачи взаимодействия жидкости и эллиптической частицы в двух постановках: обтекание эллиптического тела набегающим потоком и оседание эллиптического тела в прямоугольном сосуде.

Модель верифицирована на стандартной задаче обтекания с круглого тела набегающим потоком жидкости. Показаны сходимость метода и хорошее соответствие результатов наших расчетов результатам других авторов.

После проведенной верификации решена задача обтекания эллиптического тела в канале. Исследовано влияние ориентации тела на величины лобового сопротивления и подъемной силы, а также крутящего момента. Показано, что крутящий момент стремится развернуть частицу в положение поперёк набегающего потока, то есть в положение, когда большая ось эллипса ортогональна направлению набегающего потока. Построены линии тока и показано формирование вихревого следа за препятствием.

Второй рассмотренной задачей было оседание эллиптической частицы в прямоугольном сосуде. Показано, что при оседании частица стремится занять положение поперек набегающего потока, что согласуется с выводами в задаче об обтекании частицы набегающим потоком. (см. рис. 1).

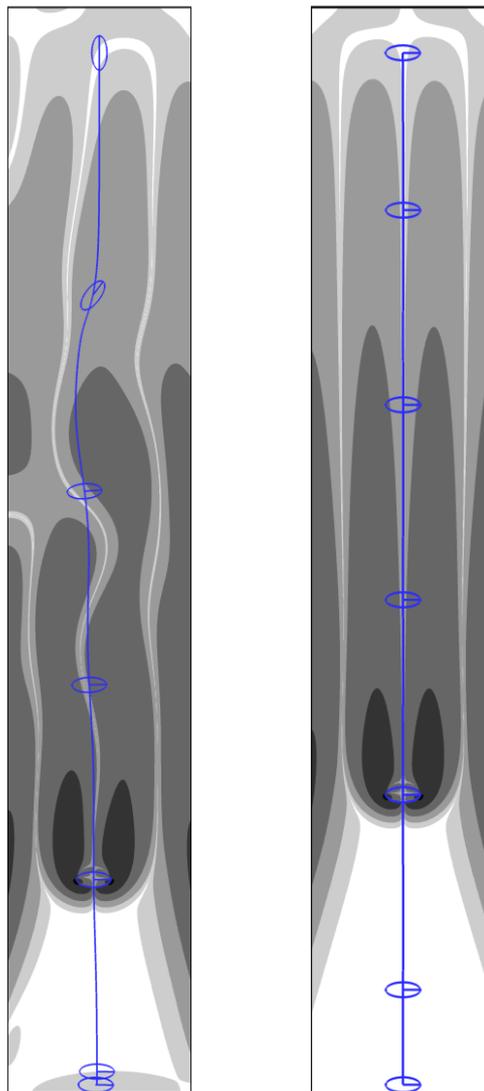


Рис.1. Траектория оседания эллиптической частицы, ее положение в различные моменты времени, а также амплитуда завихренности поля скорости (оттенки серого): вертикальное (слева) и горизонтальное (справа) начальное положение частицы.

Список литературы:

1. Esipov, D. V., Chirkov, D. V., Kuranakov, D.S., Lapin, V.N. Direct Numerical Simulation of the Segre-Silberberg Effect Using Immersed Boundary Method // Journal of Fluids Engineering. – ASME, 2019. – V. 142, N. 11, doi: 10.1115/1.4047799

УДК 621.9

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТТЕСТОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА «ЗАКРЫТИЕ ОТСЕЧНЫХ КЛАПАНОВ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ» НА СТЕНДЕ ПСБ-ВВЭР

Латкин Д.Ю., Петкевич И.Г.

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»,
142103, Московская область, Подольск, улица Орджоникидзе, 21

В 2022-ом году на стенде ПСБ-ВВЭР в рамках международного проекта АЯЭ ОЭСР «ETHARINUS» был успешно выполнен эксперимент «Закрытие отсечных клапанов при естественной циркуляции». Данный эксперимент представляет интерес благодаря расширению экспериментальной базы данных в области явлений, связанных с однофазной несимметричной естественной циркуляцией.

Цель эксперимента заключается в изучении динамики изменения естественной циркуляции первого контура при внесении быстрого возмущения и изменений условий теплоотвода через один или несколько парогенераторов.

В ходе эксперимента все парогенераторы стенда последовательно отсекаются по пару и питательной воде. После каждого отсека устанавливается новое стационарное состояние. Мощность имитаторов ТВЭЛ, а также давление в первом контуре и неотсеченных парогенераторах поддерживаются постоянными в ходе всего эксперимента. После отсека всех паро-

генераторов отвод тепла от стенда сводится к тепловым потерям. Фиксируется линейный разогрев стенда, который прекращается по факту достижения определенной температуры в первом контуре.

Претестовые расчеты и основные стадии разработки сценария эксперимента выполнялись в программном комплексе КОРСАР/ГП. Результаты эксперимента могут быть использованы для валидации одномерных теплогидравлических расчетных кодов в области несимметричной естественной циркуляции.

В рамках посттестовых расчетов были выполнены следующие задачи:

1. Сопоставлены результаты посттестовых расчетов с экспериментом
2. Оценено влияние неопределенности тепловых и гидравлических потерь на результаты эксперимента.
3. Составлена аналитическая модель несимметричной естественной циркуляции.
4. Выполнена модернизация модели напорной камеры имитатора реактора на стенде с учетом результатов эксперимента.

УДК 533.69

ЛАМИНАРИЗАЦИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ КСЕНОНА ПРИ ВДУВЕ ГЕЛИЯ

Лебеда К.С.¹, Сахнов А.Ю.¹, Наумкин В.С.¹, Брызгалов К.В.^{1,2}.

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Под ламинаризацией понимают подавление турбулентности и, как следствие, обратный переход к ламинарному режиму течения всего пограничного слоя. В работе [1] В.М. Кейс получил минимальное значение параметра ускорения $K = 3.55 \times 10^{-6}$, при котором происходит полная ламинаризация турбулентного пограничного слоя. Локальная ламинаризация представляет собой подавление турбулентности в некоторой ограниченной области течения. Это явление мало изучено. В работе [2] исследуется локальная ламинаризация при вдуве гелий-ксеноновой смеси в поток ксенона в сужающемся канале с параметром ускорения $K = 4 \times 10^{-7}$. Однако критическое значение параметра ускорения, при котором локальная ламинаризация переходит в реламинаризацию всего потока до сих пор не было определено.

В настоящей работе численно моделируется сжимаемый пограничный слой ксенона при вдуве гелия через проникающую стенку. Течение рассматривалось в сужающемся канале, при этом параметр ускорения K варьировался в диапазоне от 1×10^{-7} до 6×10^{-6} . Нижняя стенка разделена на две части: входная секция задавалась твердой непроницаемой стенкой, а последующая часть – проникаемой стенкой с нулевой интенсивностью вдува гелия.

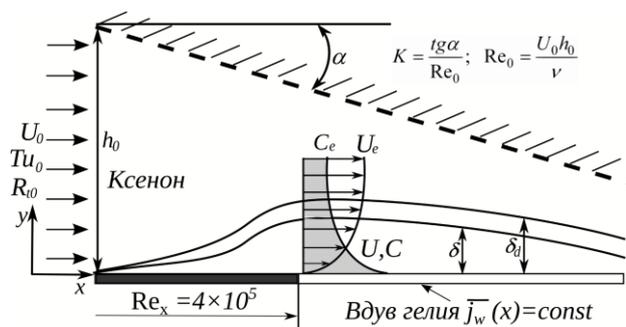


Рис. 1. Схема течения.

Численное моделирование течения проводилось в приближении пограничного слоя путем решения уравнений движения, неразрывности, энергии и диффузии, дополненных $k-\omega-\gamma$ моделью турбулентности. Выбранная модель турбулентности позволяет обоснованно моделировать ламинарно-турбулентный переход и подавление турбулентности.

Свойства гелий-ксеноновой смеси определялись с применением подхода, описанного в работе [3].

На рис. 2 представлены профили скоростей в координатах стенки при числах Рейнольдса $Re \times 10^6 = 0.5, 1, 5, 10, 60$ (линии 1-5 соответственно).

Как видно, ламинарный подслой в исследуемых условиях заметно меньше ($y^+ < 2$), чем в безградиентном турбулентном пограничном слое. Профиль скорости при $y^+ = 20 - 100$ имеет распределение, аналогичное логарифмическому закону.

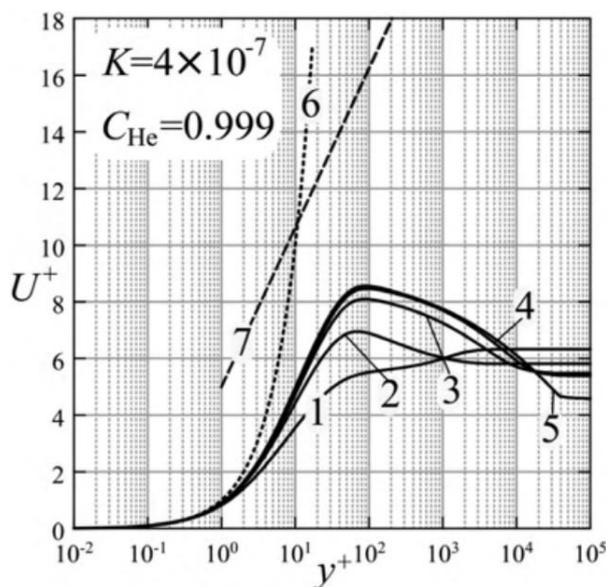


Рис. 2. Профили скорости при $K = 4 \times 10^{-7}$:
1 - 5 – профили скорости при $Re \times 10^6 = 0.5, 1, 5, 10, 60$ соответственно;
6 – ламинарный подслой;
7 – логарифмический закон.

На рис. 2 видно, что с ростом числа Рейнольдса максимум скорости увеличивается, но при достижении числа Рейнольдса 10^7 максимум скорости, как и профиль в целом не изменяется с ростом числа Рейнольдса.

Список литературы:

1. Kays W.M., Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York, 1966.
2. Sakhnov A.Yu., Local laminarization within the mild pressure gradient flow over the heated wall // Int. J. Heat and Mass Transfer 2021. V 165. Part B. Paper 120698.
3. Tournier J.-M. P., El-Genk M.S. Properties of noble gasses and binary mixtures for closed Brayton Cycle applications // Energy Conversion and Management. 2008. V. 49. P. 469–492.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-29-00210,
<https://rscf.ru/project/23-29-00210/>

УДК 532.542.3

ТРЕХМОДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ РЕЙНОЛЬДСА.

Леманов В.В., Шаров К.А., Лукашов В.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Начиная с экспериментов Осборна Рейнольдса [1] ламинарно-турбулентный переход в трубах вызывает повышенный научный интерес, как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения приложений. Сценарий трубного ламинарно-турбулентного перехода происходит через перемежаемость и характеризуется отсутствием линейной стадии развития возмущений, как в пограничном слое на пластине. В последние годы наметился серьёзный прогресс в изучении характеристик локальных турбулентных структур (puff), составляющих перемежаемое течение [2]. Главным образом, исследования последних лет были направлены на вид и амплитуду вносимых возмущений, генерирующих турбулентные области, а также внутреннюю структуру единичных puff, их поведения, и особенностей взаимодействия друг с другом. Связь перемежаемости со среднестатистическими характеристиками течения изучена довольно слабо. Специальных исследований по этому вопросу не проводилось. Считается, что при ламинарно-турбулентном переходе в трубах пульсации плавно нарастают, с увеличением числа Re , причём, максимальный рост пульсаций наблюдается возле стенки. В работе [3] отмечается возникновение максимума пульсаций на оси струи, при некотором коэффициенте перемежаемости. Пульсации на оси, с увеличением коэффициента перемежаемости растут, достигают максимума, и снова уменьшаются.

Распределение пульсаций скорости в сечении для развитого турбулентного потока в каналах, как известно, является бимодальным. Распределение имеет два максимума вблизи стенок канала и пониженную интенсивность пульсаций на оси. При переходе от ламинарного течения к турбулентному пульсации скорости растут не только возле стенок, но и в центральной части трубы, за счёт чего возникает трёхмодовое распределение пульсаций. Более подробному исследованию этого процесса посвящена данная работа.

Опыты проводились на экспериментальной установке, состоящей из баллона с газом, расходомера, генератора аэрозоля и трубки. В качестве рабочего газа использовалась двуокись углерода. Газ проходил через генератор аэрозоля, в котором засеивался мелкими каплями глицерина диаметром 3-5 мкм, для визуализации течения, затем поступал в трубку ($D = 2r = 8$ мм). Течение на выходе из трубки освещалось лазерным ножом, частота видеосъёмки составляла 7 кГц. В результате, с помощью PIV-метода, были рассчитаны поля мгновенных скоростей, из которых получены временные выборки.

Профили среднеквадратичных пульсаций продольной компоненты скорости приведены на рис. 1, где U_0 – средняя продольная скорость на оси выходного сечения трубки. Критическое число Рейнольдса при течении в трубах зависит от многих параметров, в

том числе очень чувствительно к уровню начальных возмущений. В условиях нашего эксперимента при $Re = 2400$ в потоке наблюдались редкие единичные турбулентные структуры (puff). С увеличением числа Re частота появления турбулентных структур возрастала, и с достижением числа $Re \sim 2500$ турбулентная фракция стала занимать по времени выборки примерно 50%. В этом режиме распределение среднеквадратичных пульсаций стало трёхмодовым. На оси в распределении появился третий пик (см. рис. 1, $Re = 2585$). Дальнейшее увеличение числа Re приводит к росту пульсаций в пристенной области. Пульсации на оси снижаются. При достижении турбулентного режима (см. рис. 1, $Re = 3077$) распределение среднеквадратичных пульсаций становится бимодальным с максимумами вблизи стенок.

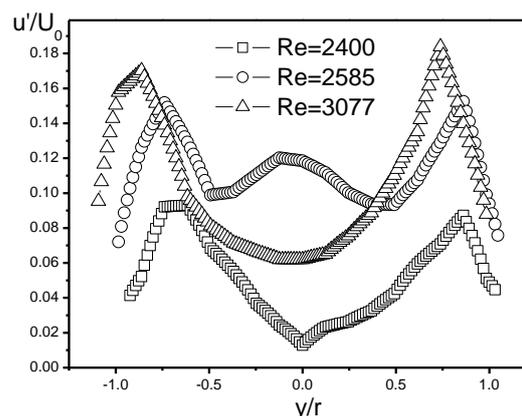


Рис. 1 Профили продольной компоненты пульсаций скорости на выходе из трубки.

Таким образом, показано, что в зависимости от степени перемежаемости течения распределение среднеквадратичных пульсаций в сечении трубы при ламинарно-турбулентном переходе может становиться трёхмодовым.

Список литературы:

1. Reynolds O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels // Philos. Trans. R. Soc. 1883. V. 174. P. 935–82.
2. Avila M., Barkley D., Hof B. Transition to turbulence in pipe flow // Annu. Rev. Fluid Mech. 2023. V. 55. P. 575–602.
3. Lemanov V.V., Lukashov V.V., Sharov K.A., Abdrakhmanov R. Kh. Laminar-turbulent transition in the near field of the jet at the instability regime of the jet source // IOP Conf. Series: J. of Physics: Conf. Series. 2018. V. 1105. 012015.

Работа выполнена при поддержке
госзадания Минобрнауки

УДК 532.517

РАЗВИТИЕ ЯВНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ

Ли Х., Яковенко С.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Для осредненных уравнений Навье–Стокса, замкнутых с помощью модели $k-\omega$, построены нелинейные аппроксимации напряжений Рейнольдса τ_{ij} , для калибровки которых, следуя [1], применено многомерное программирование экспрессии генов (MGEP). Этот метод относится к методам машинного обучения (ML) и позволяет выразить тензор анизотропии (RSA) напряжений Рейнольдса $a_{ij} \equiv 2kb_{ij} \equiv \tau_{ij} - (2/3)k\delta_{ij}$ в виде

$$b_{ij} = -s_{ij} + g^{(1)} \cdot T_{(1),ij} + g^{(2)} \cdot T_{(2),ij} + g^{(3)} \cdot T_{(3),ij} + g^{(4)} \cdot T_{(4),ij}$$

где $\{b_{ij} = -s_{ij}\}$ – линейная модель вихревой вязкости, $g^{(n)}(\lambda_1, \lambda_2)$ – линейные и квадратичные функции от скалярных инвариантов $\lambda_1 = s_{ij}s_{ji}$, $\lambda_2 = r_{ij}r_{ji}$, тензоры $T_{(n),ij}$ – линейные и квадратичные функции тензоров

$$s_{ij} = (0.5/\omega) \cdot (\partial U_i/\partial x_j + \partial U_j/\partial x_i)$$

$$r_{ij} = (0.5/\omega) \cdot (\partial U_i/\partial x_j - \partial U_j/\partial x_i)$$

Модель калибруется по данным DNS [2, 3] для канонических течений: (а) в канале с периодическими поперечными выступами (PH) при $Re = U_b H/\nu = 5600$, где U_b – среднерасходная скорость на входе, H – высота холма; (б) в квадратном канале шириной D при $Re = U_b D/\nu = 10320$. Сначала взяты члены $T_{(1),ij}$ и $T_{(2),ij}$, оказывающие наибольший вклад в RSA-тензор [4], и проведено десять различных расчетов по алгоритму MGEP. Из полученных аппроксимаций b_{ij} выбраны пять с минимальной среднеквадратичной ошибкой (RMSE), определяемой из разности данных MGEP и DNS для b_{ij} , и найдено осредненное выражение, где:

$$g^{(1)} = 0.1438 + 1.8\lambda_1 - 0.8\lambda_1\lambda_1$$

$$g^{(2)} = -1.72 + 2.17\lambda_1 - 0.4\lambda_1\lambda_1 - 0.75\lambda_2 - 0.375\lambda_2\lambda_2$$

Априорная оценка (подстановка данных [2] в LEVM-модель, где $g^{(1)} = g^{(2)} = 0$, и в MGEP-модель), показывает (табл. 1, рис. 1) потенциальную способность ML-метода к уточнению базовой модели турбулентности.

Табл. 1. Величины RMSE относительно данных DNS [2], полученные из априорных оценок моделей для PH-течения

	b_{11}	b_{12}	b_{22}	b_{33}	b_{ij}
MGEP	0.100	0.059	0.083	0.068	0.065
LEVM	0.151	0.096	0.133	0.068	0.095

Также проведены 50 расчетов по MGEP для a_{ij} , где из шести выражений с минимальными RMSE имеем:

$$g^{(1)} = 0.095 + 1.165\lambda_1 - 0.142\lambda_2 - 0.167\lambda_1\lambda_1 + 0.167\lambda_1\lambda_2$$

$$g^{(2)} = -1.524 + 1.842\lambda_1 - 0.083\lambda_2 - 0.167\lambda_1\lambda_1$$

Сначала выполнены расчеты «RANS-DNS», где в RANS-уравнения подставлено a_{ij} из данных DNS [2] и получено заметное уточнение поля скорости (рис. 2).

Следующие шаги – подстановка MGEP-моделей в RANS-решатель, поиск оптимальных для обучения кейсов и ML-метода, гиперпараметров ML-алгоритма, входных признаков $(\lambda_1, \lambda_2, \dots)$ и членов базиса $\{T_{(n),ij}\}$.

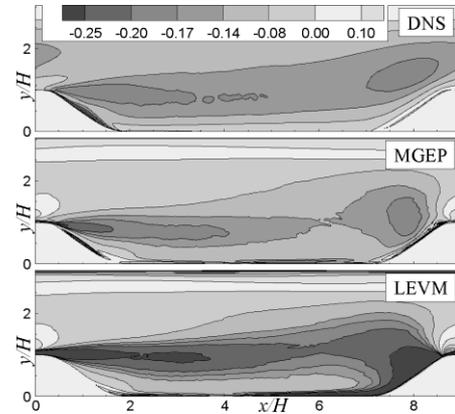


Рис. 1. Изолинии b_{12} , полученные из данных DNS [2] и из априорных оценок моделей MGEP и LEVM в PH-течении.

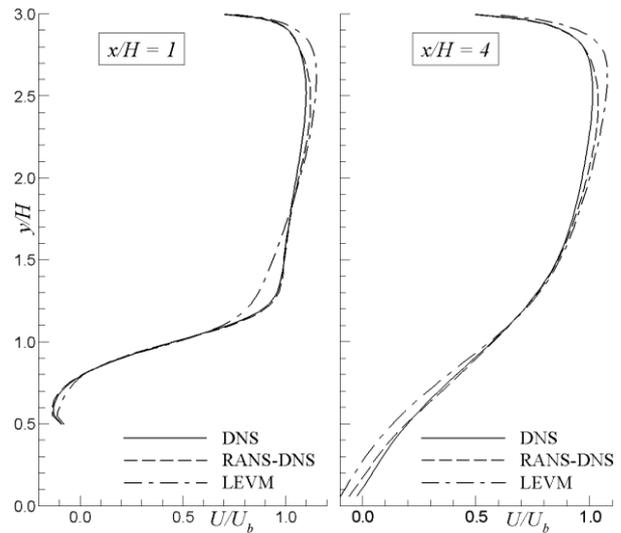


Рис. 2. Профили средней скорости в PH-течении.

Далее, ML-технологии применяются к течениям в каналах с продольными выступами и для турбулентного потока скаляра в случаях тепломассопереноса.

Список литературы:

1. Weatheritt J., Sandberg R. D. A novel evolutionary algorithm applied to algebraic modifications of the RANS stress-strain relationship // J. Comput. Phys. 2016. Vol. 325. P. 22-37.
2. Xiao H., Wu J.L., Laizet S., Duan L. Flows over periodic hills of parameterized geometries: A dataset for data-driven turbulence modeling from direct simulations // Comput. Fluids. 2020. Vol. 200. # 104431. P. 1-12.
3. Huser A., Biringen S. Direct numerical simulation of turbulent flow in a square duct // J. Fluid Mech. 1993. Vol. 257. P. 65-95.
4. Jiang C., Vinuesa R., Chen R., Mi J., Laima S., Li H. An interpretable framework of data-driven turbulence modeling using deep neural networks // Phys. Fluids. 2021. Vol. 33. # 055133. P. 1-24.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00587, <https://rscf.ru/project/22-19-00587/>

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ «ТРУБА В КАНАЛЕ» В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Лучинкин Н.А.^{1,2}, Разуванов Н.Г.^{1,2}, Полянская О.Н.^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14с1

² Объединенный институт высоких температур РАН,

125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13с2

Современные проекты реакторов на быстрых нейтронах, чистого синтеза и гибридных систем, в состоянии решить проблему замыкания топливного цикла, переработки ядерных отходов, использования ^{238}U в качестве топлива, однако требуют эффективного теплоносителя, не замедляющего нейтроны. Наиболее перспективными являются тяжелые жидкие металлы (ЖМ), такие как свинец и его сплавы. Недостаток опытных данных в открытых источниках по свойствам и закономерностям теплообмена, особенностям влияния магнитного поля и сил плавучести на неизотермический поток ЖМ, существенно усложняет моделирование контуров охлаждения новых реакторов, а также бланкетов термоядерного и гибридного реакторов.

В работе проведены исследования теплообмена при вынужденном подъемном течении жидкого металла (ртуть) в отсутствие и при наличии поперечного магнитного поля в комбинированной системе «труба в канале» (рис.1). Канал заполнен ртутью и подключен к петле естественной циркуляции. Рассмотрены различные режимы теплообменной системы с закрытой и открытой петлей. Задача моделирует движение жидкого металла в ячейке системы охлаждения канального жидкометаллического бланкета термоядерного реактора типа ТОКАМАК [1-2]. На ртутном стенде МГД-комплекса МЭИ-ОИВТ РАН с использованием микротермомпарных зондов выполнены измерения температурных полей и характеристик теплоотдачи, как во внутренней трубе, так и в межканальном зазоре.

Эксперименты проводились в следующем диапазоне безразмерных параметров: изменялись в эксперименте в диапазонах: по числам Рейнольдса $Re = 10000 \div 85000$ (1 - 8.5 л/мин), Гартмана $Na = 0 \div 470$ (1.0 Тл) и Грасгофа $Gr_q = \text{до } 1.2 \cdot 10^8$ (q_c до 35 кВт/м²).

Получен массив опытных данных по полям осредненной и пульсационной температуры в различных сечениях обогреваемого участка, распределения температуры стенки и локальных коэффициентов теплоотдачи по периметру и длине внутренней трубы, а также в характерных точках межканального зазора по всей длине зоны обогрева. В режимах работы с открытой петлей естественной циркуляции измерены локальные скорости в межканальном зазоре.

В результате действия сил плавучести и электромагнитных возникает естественная конвекция в зазоре. Конфигурация течения и его структура существенно зависит от подключения охлаждаемой петли естественной циркуляции, а также наличия поперечного МП. Конвекция теплоносителя, возникающая в канальном зазоре, улучшает теплоотдачу в исследуе-

мой системе как во внутренней трубе, так и в межканальном зазоре в большей степени, когда включена петля естественной циркуляции и в наибольшей степени, когда она дополнительно охлаждается.

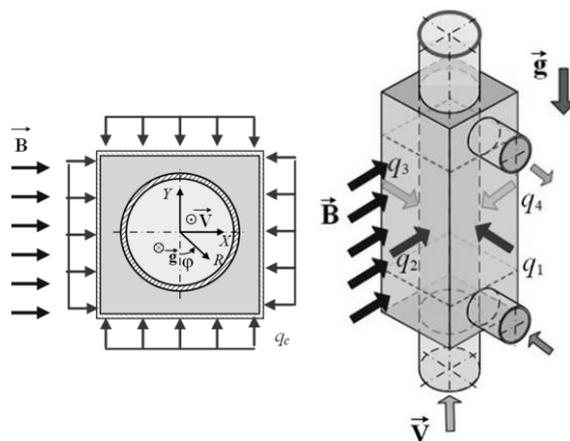


Рис. 1 Схема течения и обогрева исследуемого участка.

Структура естественно-конвективных потоков в отсутствие МП в зазоре имеет турбулентный характер, а при наличии поперечного МП существенно меняется. МП с одной стороны подавляет мелкомасштабную турбулентность, а с другой приводит к дополнительной неустойчивости и появлению крайне низкочастотных колебаний температуры, которые проникают в стенки канала и трубы. Максимальная температура во всех режимах наблюдалась в углах канала.

Наиболее выгодным с точки зрения эффективности теплообмена системы «труба в канале» является режим работы с охлаждаемым контуром естественной циркуляции. При этом значительно снижаются температура, как в трубе, так и в зазоре между каналом и трубой, а течение в поперечном МП становится более устойчивым – почти ламинарным.

Список литературы:

1. Мирнов С. В. и др. Концепция гибридного энергетического реактора синтез—деление на основе токамака с бланкетом на отвалном уране // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2019. – Т. 42. – №. 2. – С. 23-30.
2. А.И. Касаткин, В.М. Корень, А.В. Салтыковский, А.М. Шапиро. Нейтронно-физические характеристики бланкета опытного термоядерного реактора с использованием в качестве теплоносителя эвтектику висмут-свинец. Труды ЦКТИ. 1990 вып. 264, с. 28-34.

Работа поддержана Российским научным фондом
(грант № 22-29-00878)

УДК 537.84

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СТЕНКИ И ИНДУКЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТУРБУЛЕНТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ РТУТИ В НЕОДНОРОДНО ОБОГРЕВАЕМЫХ ТРУБАХ

Макаров М.В., Артемов В.И., Яньков Г.Г.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная, 14

За последнее десятилетие выполнен значительный объем как экспериментальных, так и расчетных исследований турбулентных течений ртути в трубах и каналах различной ориентации в пространстве при неравномерной тепловой нагрузке и воздействии поперечного магнитного поля (МП) [1]. Совместное влияние на поток электромагнитных сил и свободной конвекции приводит в отдельных режимах к низкочастотным колебаниям температур жидкости и внутренней поверхности стенки канала, достигающих аномально высоких амплитуд. Подобные эффекты могут оказаться весьма опасными в жидкометаллических системах охлаждения термоядерных устройств. Пульсации температуры внутри твердой стенки, а также влияние на амплитуды пульсаций и структуру течения теплофизических и электрических свойств материала стенки остаются практически не изученными. В настоящей работе выполнено численное моделирование методом LES турбулентных течений ртути в неоднородно обогреваемых трубах при воздействии поперечного МП и сил плавучести в сопряженной со стенкой постановке с учетом возможных тонких слоев отложений (оксидов, загрязнений) на внутренней поверхности стенки, отличающихся низкой электропроводностью.

Методология. Рассматривается течение ртути в вертикальных и горизонтальных стальных трубах, диаметром $D=19$ мм и толщиной стенки 0,5 мм. Длина рабочего участка трубы $45D$. Половина внешней поверхности трубы (полуокружность в поперечном сечении) обогревается с постоянной плотностью теплового потока q_w .

Параметры моделируемых режимов: $Re=10000$; $Gr_q=4,4 \cdot 10^7 - 6 \cdot 10^7$; $Na=0 - 1000$; $Pr=0,024$. Числа подобия рассчитаны по диаметру трубы, в качестве плотности теплового потока в числе Грасгофа используется $0,5q_w$.

Расчеты выполнены с помощью авторского кода ANES [2]. Математическое описание задачи включает в себя уравнения сохранения массы, импульса и энергии, а также уравнение Пуассона для электрического потенциала. Свойства жидкости, стенки и слоя отложений считаются постоянными. Для учета сил плавучести используется приближение Буссинеска. Подсчиточная турбулентность рассчитывается с помощью модели CSM, предложенной в [3].

Расчетная область вдоль оси трубы разбивается на три участка: генератор входной турбулентности, рабочий участок, включающий зону нагрева и зону действия МП, и адиабатный участок. Общая длина расчетной области - $65D$. Число ячеек расчетной сетки - 13,1 - 13,5 млн.

Моделирование пленки отложений на внутренней поверхности твердой стенки проводилось путем выде-

ления тонкой области толщиной δ_f с электропроводностью σ_f , определяемой с помощью коэффициента $k_f = \delta_f \sigma_f / (0,5D\sigma_f)$, значения которого принимались равными 10, 30, 90 и 10000 (σ - электропроводность ртути).

Результаты расчетов. Проведены серии расчетов для вертикальных (опускное течение) и горизонтальных труб при различных числах Na и электропроводностях слоя загрязнений.

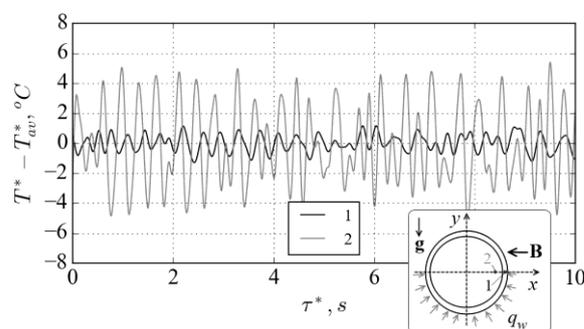


Рис.1 – Температурные пульсации: 1 - в стенке, 2 - в жидкости, $Re=10000$, $Gr_q=4,4 \cdot 10^7$, $Na=300$, $k_f=10000$

На рисунке 1 для одного из режимов представлены температурные пульсации в подогреваемой снизу горизонтальной трубе, в двух точках контрольного сечения $37D$ от начала обогрева. Точки расположены на горизонтальной оси поперечного сечения, 1 - в середине стенки трубы, 2 - на расстоянии $0,375D$ от центра. Хорошо заметно, что амплитуды пульсаций температуры в стенке в 4 раза меньше, чем амплитуды пульсаций жидкости в пристеночной зоне.

Выявлено существенное влияние электропроводности отложений на стенке на структуру течения жидкости, амплитуды и частоты пульсаций всех искомых переменных (температуру, скорость, электрический потенциал) как в вертикальных, так и горизонтальных трубах.

Все расчеты проведены с использованием суперкомпьютеров «Fisher» ОИВТ РАН и MVS 10P МСЦ РАН. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания № FSWF-2023-0017 (Соглашение № 075-03-2023-383 от 18 января 2023 г.) в сфере научной деятельности на 2023-25 гг.

Список литературы:

1. Zikanov O., Listratov Y., Belyaev I., Frick P., Razuvanov N., Sviridov V. Mixed convection in pipe and duct flows with strong magnetic fields // Appl. Mech. Rev., Jan 2021, 73(1): 010801
2. Код ANES, URL: <http://anes.ch12655.tmweb.ru>.
3. Kobayashi H. The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow // Phys. Fluids, 2005, 17, 045104. doi:10.1063/1.1874212.

УДК 536.24

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО СОПРЯЖЕННОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ ПЛОСКИХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ**Митин К. А., Кислицын С. А., Бердников В. С.**Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследования термогравитационной конвекция в вертикальных и наклонных плоских слоях жидкости со стенками, нагретыми до разных температур – одной из классических задач физической гидродинамики [1-3], остаются актуальными до настоящего времени. Результаты ранних исследований, имеющие теоретическое и прикладное значение, наиболее полно систематизированы в монографиях [1, 3]. Анализ этих результатов и текущих публикаций показывает, что в подавляющем большинстве работ исследовались установившиеся течения при стационарных граничных условиях. Изучалась пространственная форма установившихся течений, определялись пороги устойчивости ламинарных течений и в меньшей степени исследовались процессы ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) и их влияние на особенности теплообмена. В то же время во многих технических и технологических системах в режимах нагрева или охлаждения ограждающих стенок развивается нестационарная термогравитационная конвекция. В случае не полного заполнения объема полости и наличии свободной поверхности жидкости при боковом подогреве возникает тепловая гравитационно-капиллярная конвекция. Топливные баки авиационной и ракетной техники наиболее очевидные примеры таких систем. Тепловое состояние тонкостенных конструкций летательных аппаратов (ЛА) меняется в процессах взлета и посадки [4] в результате нестационарного сопряженного конвективного теплообмена в топливных баках и в воздушных прослойках фюзеляжа. В последние годы в ИТ СО РАН были проведены исследования ЛТП в плоских и кольцевых вертикальных слоях с использованием современной тепловизионной и цифровой видеотехники [5-7]. Экспериментально и численно изучено влияние сопряженного свободноконвективного теплообмена на распределения температуры в массивных и тонких стенках различной теплопроводности в установившихся и в нестационарных режимах. Данная работа, является развитием серии работ [5-7].

Численно методом конечных элементов исследованы процессы развития нестационарных пограничных слоев при внезапном и монотонном разогреве до заданной температуры внешней поверхности одной из стеклянных стенок вертикальных слоев этилового спирта. Формирование нестационарных пограничных слоев на стенках исследовано в зависимости от высоты и толщины слоев жидкости. Толщина слоев жидкости $L = 60, 30$ и 18 мм, толщина стенок 6 мм. Расчёты проведены при дискретном наборе высот слоя $1 \leq H/L \leq 9$. Решалась система уравнений термогравитационной конвекции в переменных вихрь, функция тока и температура. Получены распределения нестационарных полей температуры в жидкости и в стенках, поля градиентов температуры и поля скорости в жидкости. Изучена эволюция во времени локальных и интегральных тепловых потоков. В сопряжённой постановке задачи исследовано развитие конвективного течения при наклоне слоя от вертикали на $0, 30, 45$ и 60 градусов. Процессы формирования нестационарных пограничных слоев на стенках исследованы в режимах внезапного охлаждения или нагрева одной из стенок. Изучены процессы формирования вторичных вихрей в пограничном слое, турбулизация ядра слоя жидкости, развитие пограничного слоя на противоположной стенке и закономерности локального сопряженного теплообмена. Исследовано влияние пространственно-временных характеристик конвективных течений и амплитудно-частотных характеристик пульсаций температуры на нестационарные поля температуры в обтекаемой стенке.

Особенности развития пространственной формы течения и нестационарного сопряженного конвективного теплообмена между слоями жидкости и газа существенно влияют на нестационарные поля температуры и градиенты температуры в тонкой металлической перегородке. Максимальные градиенты температуры в перегородке возникают на начальной стадии развития течения. Аналогичные исследования нестационарной конвекции и сопряженного конвективного теплообмена проведены в случае прямоугольной полости с тонкой вертикальной перегородкой, разделяющей слой жидкости и газа.

Список литературы:

1. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., М.: Наука, 1972. 392 с.
2. Kutateladze S.S., Berdnikov V.S. Structure of thermogravitational convection in flat variously oriented layers of liquid and on a vertical wall // Int. J. Heat Mass Transfer. 1984. Vol.27. N9. P. 1595-1611.
3. Gebhart B., Jaluria Y., Mahajan R.L., Sammakia B. Buoyancy-induced flows and transport. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1988. 613 p.
4. Белов В.К., Белов В.В. Прочность и устойчивость ракетных и авиационных конструкций при термосиловом нагружении. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2011. 491 с.
5. Бердников В.С., Гапонов В.А., Гришков В.А., Лиханский П.М., Марков В.А. Влияние нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции на распределение температуры в тонкой вертикальной стенке // Теплофизика и аэромеханика, 2010, т.17, № 2, с.197-208.
6. Бердников В.С., Гришков В.А., Шумилов Н.А. Развитие нестационарной конвекции в прямоугольной полости при внезапном нагреве вертикальной стенки // Теплофизика и аэромеханика, 2020, том 27, № 4, с. 555 - 564.
7. Бердников В.С., Кислицын С.А. Численные исследования нестационарного сопряженного конвективного теплообмена в вертикальных слоях жидкости и газа, разделенных тонкой металлической перегородкой // Теплофизика и аэромеханика, 2021, том 28, № 1, с. 107-119.

УДК 532:616

ГЕМОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ УВЕЛИЧЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ СОСУДИСТЫХ ТРАНСПЛАНТАНТОВ

Молочников В.М.¹, Мазо А.Б.², Калинин Е.И.², Пашкова Н.Д.¹, Никифоров И.В.^{1,3}

¹ Институт энергетик и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН, 420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Россия, Казань, ул. Кремлевская, 18

³ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ 420111, Россия, Казань, ул. К. Маркса, 10

При атеросклеротическом поражении происходит сужение просвета артерий вплоть до их полной закупорки (окклюзии), что приводит к недостаточному снабжению тканей кислородом. При значительной протяженности пораженного сегмента артерии единственным методом лечения остается шунтирование – создание кровотока в обход пораженного участка. Постоперационные наблюдения свидетельствуют, что 10 – 15% шунтов окклюдзируются в течение первого года после операции, а около половины остаются эффективными в течение 5–10 лет. Общеизвестно, что на эти процессы существенное влияние оказывает локальная гемодинамика: наличие отрывных зон, низкое трение и его значительные градиенты по пространству и времени [1]. Несмотря на значительное количество публикаций, детальная трехмерная структура течения, а также возможная турбулизация потока в области соединения шунта и артерии-хозяина (анастомозе) изучены недостаточно. В настоящей работе представлены результаты эксперимента и прямого численного моделирования стационарного и пульсирующего течения в области дистального анастомоза бедренной артерии человека. Эксперимент включал визуализацию потока и измерения мгновенных векторных полей скорости в плоскости геометрической симметрии анастомоза с использованием техники SIV. Исследования на стационарном режиме проводились при двух числах Рейнольдса, соответствующих интервалу физиологических значений при оценке по среднему ($Re = 240$) и максимальному ($Re = 1640$) расходу крови за период сердечных сокращений. Для пульсирующего течения закон изменения расхода за период колебаний был близок к закону течения крови в бедренной артерии. Соотношение расходов через ответвления основной артерии составляли 80% – в антеградном и 20% – в ретроградном направлениях.

Анализ результатов исследований показал, что в стационарном потоке на ближней к месту соединения шунта с артерией-хозяином, образующей обоих ответвлений, формируются отрывные области, уменьшающие «живое» сечение потока. При $Re = 240$ течение в этих областях стационарное ламинарное. При $Re = 1640$ обнаружены признаки потери устойчивости и перехода к турбулентности в слое смешения на границе отрывных областей в ответвлениях, которые заключаются в существенном (до 30% скорости потока в подводящем канале) увеличении интенсивности пульсаций продольной компоненты скорости потока и росте рейнольдсовых напряжений. В пределах этого

слоя в спектре пульсаций скорости хорошо выделяется инерционный интервал, соответствующий закону « $-5/3$ », а ламинарно-турбулентный переход локализован в пределах $x/d \approx 0.1 - 5.0$. В обоих ответвлениях в пределах областей отрыва потока развиваются поперечные течения, которое имеет вид парных вихрей – подобие вихрей Прандтля второго рода. Эти течения индуцируют окружную компоненту вектора поверхностного трения, которая в некоторых областях стенки сопоставима по величине с его продольной компонентой. Получены распределения модуля вектора трения по окружной координате. Выполнена оценка размеров областей стенки, в которых значение модуля трения ниже величины трения неповрежденной артерии при соответствующих числах Рейнольдса. В пульсирующем потоке также имеет место формирование вторичных течений Прандтля первого рода, локализованных в пределах отрывных областей, формируемых в соответствующих фазах пульсаций расхода. В слоях смешения на границах этих областей наблюдается существенный рост пульсаций скорости, локализованный по фазе вынужденных колебаний потока. Установлено, что рост пульсаций обусловлен двумя физическими механизмами: низкочастотными колебаниями формы области отрыва потока (нарушение повторяемости осциллограмм скорости) и формированием на ее внешней границе вихревых структур – так называемых разгонных вихрей (появление высокочастотных пульсаций скорости в фазах торможения потока). Эти вихри являются предвестниками локальной турбулизации потока, однако признаков развитой турбулентности в пульсирующем течении не обнаружено. По результатам исследований намечены возможные пути уменьшения размеров рециркуляционных областей в зоне анастомоза и, как следствие, возможного увеличения срока службы сосудистых трансплантатов.

Список литературы:

1. Tiwari A. et al. Improving the patency of vascular bypass grafts: the role of suture materials and surgical techniques on reducing anastomotic compliance mismatch // European journal of vascular and endovascular surgery. – 2003. – Vol.25, №. 4. – PP. 287-295
2. Mikheev N.I., Goltsman A.E., Saushin I.I., Dushina O.A. Estimation of turbulent energy dissipation in the boundary layer using Smoke Image Velocimetry // Experiments in Fluids (2017) Volume 58, Issue 8, article 97.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 20-61-47068)

УДК 533.69

ВЛИЯНИЕ ВДУВА ГЕЛИЯ НА ЛОКАЛЬНУЮ ЛАМИНАРИЗАЦИЮ В УСКОРЕННОМ ПОТОКЕ КСЕНОНА

Наумкин В.С., Сахнов А.Ю., Брызгалов К.В., Лебеда К.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

При течении газового теплоносителя в конфузорах в профили продольной скорости может наблюдаться эффект прострела, когда скорость течения в пограничном слое превышает скорость основного потока [1]. Это может приводить к локальной ламинаризации потока вблизи стенки при сохранении турбулентного режима течения во внешней части пограничного слоя. Локальная ламинаризация приводит к тому, что характеристики потока, такие как коэффициент трения, число Стантона и др., принимают значения между соответствующими величинами для ламинарного и турбулентного режимов [2].

В данной работе рассмотрено влияние вдува гелия в поток ксенона через проницаемую стенку на характеристики ускоренного пограничного слоя и проанализировано влияние вдува на возникновение и развитие локальной ламинаризации потока.

На рис. 1 представлена схема исследуемого течения. Плоская пластина обдувается потоком ксенона, в начале пластины при $Re_x < 4 \cdot 10^5$ располагается непроницаемый участок, после которого находится проницаемый участок пластины, через который осуществляется вдув гелий-ксеноновой смеси с фиксированной концентрацией гелия. На внешней границе пограничного слоя задано условие ускорения потока через параметр ускорения $K = \mu/\rho U_e (dU_e/dx)$, равный $4 \cdot 10^{-7}$. Рассматривалась двумерная постановка.

Математически задача описывалась системой уравнений пограничного слоя, дополненной $k-\omega-\gamma$ моделью турбулентности [3]. Так же решались уравнения энергии и диффузии. Свойства смеси и отдельных компонентов рассчитывались по методике [4]. Поставленная задача решалась методом конечных разностей.

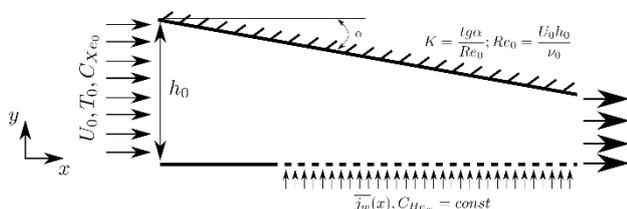


Рис. 1 Схема течения

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса при различных значениях концентрации гелия на стенке. В данном случае считалось, что поперечная скорость вдуваемого газа на стенке близка к нулю. При $Re_x = 2 \cdot 10^5$ на пластине наступает ламинарно-турбулентный переход. При малом содержании гелия на стенке (линия 1) значение коэффициента трения лежит выше классической зависимости, что связано с влиянием градиента давления.

В полностью турбулентном течении (линии 2, 3) коэффициент трения снижается с увеличением концентрации гелия на стенке.

При концентрации гелия на стенке меньше 0.19 пограничный слой остаётся турбулентным. Увеличение концентрации гелия на стенке до 0.19 и выше приводит к ламинаризации потока (линии 3-5) - значения коэффициента трения в этих случаях лежат ниже значений коэффициента трения в заведомо ламинарном ускоренном течении, рассчитанном без модели турбулентности (линии 6-7). Это связано с тем, что в турбулентном режиме снижается прострел скорости в пограничном слое. В свою очередь, меньшие значения максимальной скорости снижают градиент скорости на стенке и, следовательно, коэффициент трения.

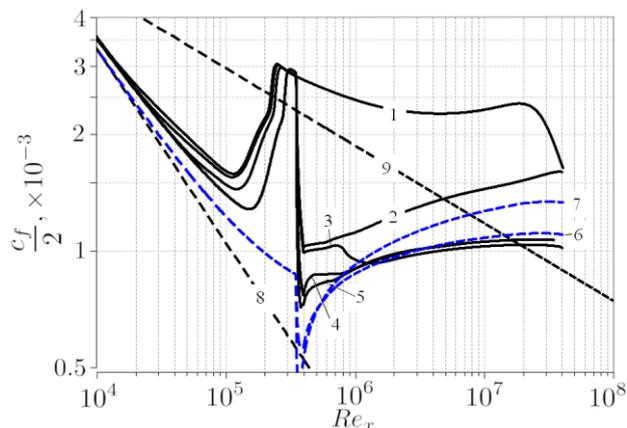


Рис. 2 Зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса при различной концентрации гелия на стенке: 1-5: $C_{wHe}=0.001, 0.17, 0.19, 0.5, 0.99$ соответственно; 6-7: расчёт течения без модели турбулентности при $C_{wHe}=0.19, 0.99$ соответственно; 8: $c_f/2 = 0.332 \cdot Re_x^{-0.5}$, 9:

$$c_f/2 = 0.0296 \cdot Re_x^{-0.2}$$

Список литературы:

1. Sakhnov A.Yu., Naumkin V.S., Velocity overshoot within the accelerated subsonic boundary layer over the heated wall // International Journal of Heat and Mass Transfer.-2020.-V.161, № 120249
2. Sakhnov A.Y. Local laminarization at negligible light gas injection into the compressible weakly accelerated boundary layer// International Journal of Heat and Mass Transfer.-2022.-V.182, № 121975
3. Ge X., Arolla S., Durbin P. A Bypass Transition Model Based on the Intermittency Function // Flow Turbulence Combust.-2014.-V.93.- pp. 37–61
4. El-Genk M.S., Tournier J.-M. Noble gas binary mixtures for gas-cooled reactor power plants // Nuclear Engineering and Design.-2008.- V.238, № 6.- pp. 1353–1372

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-29-00210,
<https://rscf.ru/project/23-29-00210/>

УДК 532.517.4 532.574.7

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРЕТОЙ СТРУИ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ

Небучинов. А.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Струя в поперечном потоке — это фундаментальное явление, которое включает важные компоненты многих инженерных приложений. Пульсации расхода струи оказывает значительное влияние на тепловые и гидродинамические характеристики в различных энергетических установках, системах распределения жидких и газообразных энергоносителях.

Струи, впрыскиваемые перпендикулярно в поперечный поток, можно найти в ряде технологических систем. Струя в поперечном потоке или поперечная струя используется для разбавления или впрыска воздуха в камеры сгорания газовых турбин для достижения соотношения смеси и контроль NOx, а также охлаждение горячей части турбины; в пленочном охлаждении лопаток турбин; в впрыске топлива в высокооборотных воздушно-реактивных двигателях; и других высокоскоростных транспортных средств. Поперечные струи также встречаются в системах контроля окружающей среды, включая контроль стоков из дымоходов и шлейфов дымовых труб.

Характеристики течения в поперечных потоках в ближней зоне очень сложны. Взаимодействие между вертикальной струей и основным поперечным потоком создает множество вихревых структур, в том числе вращающиеся в противоположных направлениях вихревые пары, подковообразные вихри, вихри следа, вертикальные и кольцеобразные вихри.

В работе использовался метод анемометрии по изображениям частиц с высоким временным разрешением (Time resolved PIV) для исследования турбулентных характеристик потока, а также выполнены термопарные измерения средней температуры струи. Получена комплексная база данных. По результатам измерений мгновенной скорости были рассчитаны поля статистических моментов.

Из анализа мгновенных полей скорости (см. рис. 1(а)). можно заключить, что при вдуве поперечного потока, происходит турбулизация основного потока, при этом высота подъема пульсирующей струи зависит от режима истечения (см. рис. 2(а)). На рис. 1 (а) показано поле мгновенной скорости, где $v/|u|$ есть отношение амплитуды мгновенной скорости к среднему расходу пульсирующей струи. Видно, как вихревые структуры поднимаются от входа струи и распространяются вдоль основного потока. Вихри сдвигового слоя начинают разрушаться примерно при $x/d \approx 2,5$. Также видно, что сразу после выхода струи возникает обратное течение. Максимальные значения скорости за период для пульсирующей струи достигают $2,5 \cdot v/|u|$

На рисунке 2(б) показаны результаты термопарных измерений средней температуры струи при $f = 0$ Гц в сечении относительно вертикали, проведенной через правый край трубки. Результаты представлены в виде температурных профилей в зависимости от удаления от среза сопла струи при различных скоростях основного потока. Температура струи составляла $T = 134^\circ\text{C}$, а сносящего потока - $T_0 = 22.7^\circ\text{C}$.

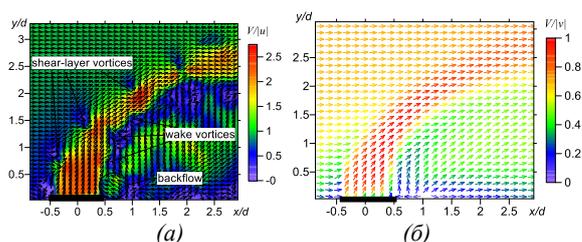


Рис. 1. Распределения мгновенной (а) и средней (б) скорости для скорости основного потока $V=3$ м/с скорости поперечного пульсирующего потока $U = 4,7$ и частоты $f=0$ Гц.

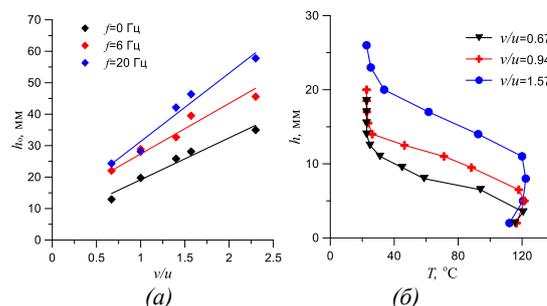


Рис. 2. Высоты поднятия струи в зависимости от отношения скорости струи и потока v/u , а также частоты пульсаций f струи (а); профили температуры потока в зависимости от удаления от среза сопла струи (б).

Список литературы:

1. Yuan, L.L., Street, R.L. & Ferziger, J.H. Large-eddy simulations of a round jet in crossflow. // J. Fluid Mech. 1999. 379, 71–104.
2. Bidan G., Nikitopoulos D.E. On steady and pulsed low-blowing-ratio transverse jets // J. Fluid Mech. 2013, 714, 393–433.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 532.517.4 532.574.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ИМПАКТНЫХ СТРУЯХ

Небучинов А.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Методы струйного охлаждения легко реализуются и широко используются в различных системах, где требуется высокая скорость теплопередачи. Импактные струи применяются для охлаждения, нагрева и сушки. Типичные области применения включают охлаждение лопаток турбин и электрооборудования, сушку текстиля и других смачиваемых поверхностей, а также нагрев или охлаждение металлических пластин.

Теплообмен на поверхности, которая охлаждается импактной струей, полностью зависит от гидродинамики потока. При этом турбулентными характеристиками потока можно в некоторой степени управлять. Существуют активные и пассивные методы управления. К активным методам относится внесение внешних возмущений в поток, к пассивным – создание граничных условий в потоке, с помощью закрутки потока, изменения геометрии сопла.

Известно, что внесение в поток внешних периодических возмущений с различной частотой интенсифицируют либо уменьшают средний теплообмен на нагреваемой преграде [1]. Закрутка потока изменяет характер течения, что приводит к локальному увеличению теплообмена на нагревателе при малых расстояниях между соплом и импактной поверхностью [2]. Напротив, поток, образованный соплом с шевронами, охлаждает нагреваемую преграду более интенсивно на больших расстояниях [3].

Объектом исследования являлась импактная круглая струя, с внесением внешнего возмущения и без, закрученная и шевронная струя, натекающая перпендикулярно на равномерно нагреваемую плоскую поверхность. Число Рейнольдса в экспериментах составляло 6000. Частоты вносимых возмущений соответствовали $St=0,2-1,2$. Закрутка потока формировалась соплом с установленным внутри завихрителем с разным наклоном лопаток. В случае шевронной струи, использовалась насадка на сопло с лучеобразными вырезами от центра к периферии.

На рисунке 1 (а, б) представлены результаты для круглой импактной струи без закрутки и шевронов. При расстояниях между соплом и импактной поверхностью ($h/D = 3$) внесение возмущения в поток приводит к увеличению интенсивности теплообмена в области $r/D = 0 - 3,3$. При увеличении расстояния от среза сопла до стенки распределения коэффициентов теплообмена принимают более монотонно спадая по мере удаления от критической точки и средний теплообмен уменьшается с увеличением расстояния до него.

Для закрученной струи на её оси находится локальный минимум (см. рис. 2(а)). Далее идёт значительное увеличение коэффициентов теплообмена до $r/D \approx 1,4$, где находится локальный максимум и после плавное ослабление интенсивности по мере удаления от оси сопла. На этих h/D внесение закрутки интенсифицирует теплообмен в области $r/D=0,5-3$. Разница

интегральных значений числа Нуссельта закрученной струи и прямоочной достигает 19% при $h/D=0,5$ и 12,5% при $h/D=1$. Увеличивая расстояние между нагреваемой поверхностью и соплом, интенсивность теплопередачи ослабевает во всей области. Это происходит вследствие торможения закрученного потока за счёт смешения струи с внешней средой.

В случае струи с шевронами (см. рис. 2(б)) коэффициенты теплообмена более высокие, по сравнению с круглой струей на поверхности и имеют монотонный характер.

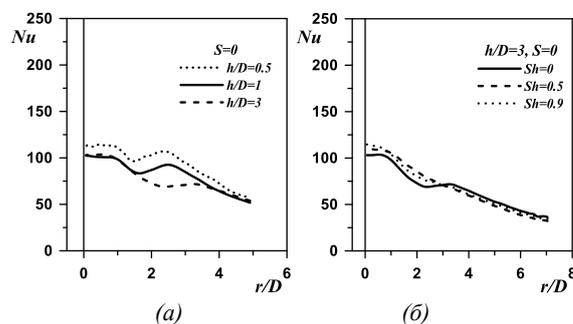


Рис. 1. Распределения числа Нуссельта в зависимости от расстояния между соплом и поверхностью (а) и частоты пульсаций (б) для круглой струи.

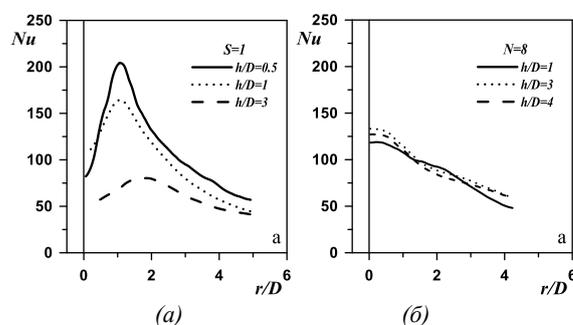


Рис. 2. Распределения числа Нуссельта для закрученной (а) и шевронной (б) в зависимости от расстояния между соплом и поверхностью.

Список литературы:

1. Liu T., Sullivan J.P., Heat transfer and flow structure in an excited circular impinging jet, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996. Vol. 39. No 17. pp. 3695-3706. 401 – 410.
2. Atsushi Nozaki, Yasumitsu Igarashi, Koichi Hishida. Heat Transfer Mechanism of a Swirling Impinging Jet in a Stagnation Region, Heat Transfer—Asian Research, 2003. 32. (8). pp. 663–673.
3. Bridges, J., & Brown, C. A. Parametric testing of chevrons on single flow hot jets// Collection of Technical Papers - 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conferenc., 1 September 2004, pp. 284–300.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН

УДК 532.135

ЗАДАЧИ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ В МОДЕЛЯХ РЕЛАКСИРУЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Петрова А.Г.^{1,2}, Пухначев В.В.^{2,3}, Фроловская О.А.²

¹ Алтайский государственный университет, 656049, Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61

² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

³ Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Модели релаксирующих жидкостей применяются для описания движения водных растворов полимеров. Известны следующие модели релаксирующих жидкостей: наследственная модель Войткунского-Амфилохиева-Павловского, ее упрощение (модель Павловского), модель жидкости второго порядка. Уравнения всех указанных моделей содержат коэффициент релаксационной вязкости. Этот параметр является эмпирическим, надежных способов для определения его характерных значений пока не существует, но можно считать его достаточно малым.

Общей теории задач со свободной границей для релаксирующих жидкостей в настоящее время не имеется. Это повышает роль точных решений, анализируя которые можно получить информацию о качественных свойствах решений указанных моделей. Этому способствует наличие у них весьма широкой группы допустимых преобразований.

В докладе рассматриваются следующие задачи со свободной границей: задача о заполнении сферической полости, задача о повороте полосы, задача о вращении слоя, верхняя граница которого свободна. Решения этих задач являются инвариантными или

частично инвариантными решениями соответствующих систем уравнений.

Задача о заполнении сферической полости характерна тем, что релаксационные свойства жидкости проявляются лишь на свободной поверхности. Показано, что время заполнения полости конечно, если поверхностное натяжение отлично от нуля, хотя асимптотика решения вблизи коллапса различна в разных моделях.

В отличие от первой задачи задача о повороте полосы со свободной границей описывается линейными уравнениями, решения которых представимы в виде ряда Фурье. Характерной особенностью этой задачи является наличие пограничного слоя, сосредоточенного вблизи начального момента времени.

Известное решение Кармана в докладе обобщается в трех направлениях: жидкость является релаксирующей, движение нестационарное, существует плоская свободная поверхность, параллельная вращающейся плоскости. Изучена зависимость толщины слоя жидкости от времени для различных режимов вращения плоскости.

УДК 532.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ДВУХСПИРАЛЬНОЙ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ В ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ

Сентябов А.В.^{1,2}, Платонов Д.В.^{1,2}, Скрипкин С.Г.¹, Шторк С.И.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

Динамика спиральных вихрей широко изучается экспериментальными [1], численными и даже аналитическими методами, однако расчетных исследований течения в тангенциальной вихревой камере практически не встречается. Особенно сложным для численного моделирования представляются такие режимы, как формирование двухспиральной вихревой структуры.

Для численного моделирования вихревого течения в тангенциальной камере [2, 3] были построены несколько вариантов модели. Закрутка потока определялась по геометрическим параметрам тангенциальной камеры и составляла $S = 6,6$. Расчет турбулентного течения проводился методом LES с подсеточной моделью WALE.

Для предварительных расчетов вихревого течения в тангенциальной камере были построены несколько геометрических вариантов модели с акцентом на различные детали проточного тракта. Так, добавление к модели упрощенных вариантов подводящих и отводящих трактов не показали заметного влияния этих условий на поле скорости внутри камеры. Добавление к геометрии входного распределительного участка показало заметную неравномерность потока на входе в сопла, которая, однако, лишь незначительно увеличивала степень закрутки по сравнению с экспериментом. Более важным была детализация места сопряжения сопел с внутренним пространством тангенциальной камеры, что позволило получить корректное распределение тангенциальной компоненты скорости по радиусу камеры. Также были проведены расчеты с различной сеточной детализацией. Детализация расчетной сетки до 37 млн. ячеек немного улучшила совпадение с экспериментом, увеличив область твердотельного вращения на графике распределения тангенциальной компоненты скорости по радиусу (Рис. 1).

Интересным является динамика закрученного течения. После установления течения в нем формируется прецессирующая двухспиральная вихревая структура. Тем не менее, она не является полностью симметричной и устойчивой. По мере её вращения закрутка перераспределяется между двумя спиральными вихрями вплоть до почти полного вырождения одного из них, а потом снова восстанавливается. Постепенно отдельные ветви структуры сливаются, оставляя только боковой вихрь в верхней части камеры (Рис. 2). Одновременно меняются и частотные характеристики течения, рассматриваемые посредством пульсаций давления на стенке тангенциальной камеры. В начале нестационарного расчета в спектре

выделяется частота, соответствующая $St = 1,2$. Постепенно частота повышается и достигает $St = 1,8$. Причем кроме доминантной частоты $St = 1,8$ в спектре также присутствует частота $St = 0,8$.

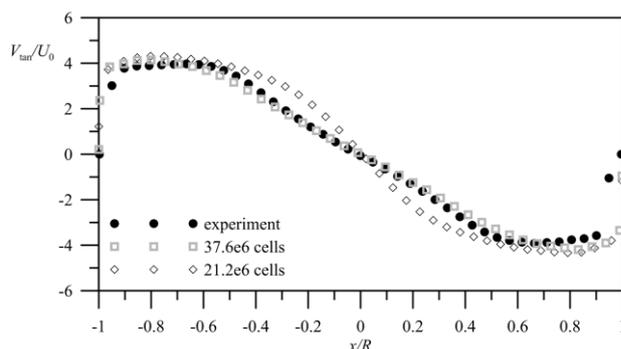


Рис. 1. Тангенциальная компонента скорости в поперечном сечении 320 мм от дна.

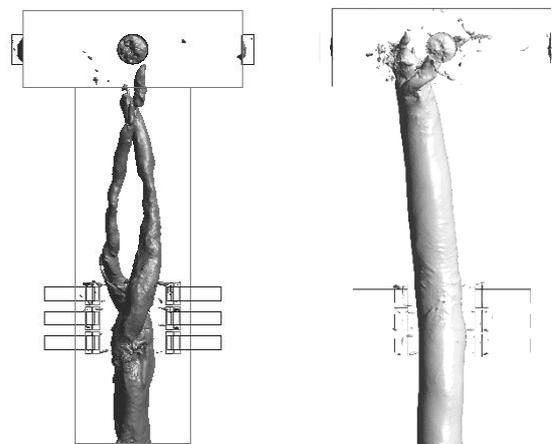


Рис. 1. Вихри, визуализированные изоповерхностью давления в разные моменты времени.

Список литературы:

1. Alekseenko S.V., Kuibin P. A. and Okulov V. L. Theory of Concentrated Vortices: an Introduction, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York. 2007.
2. Dremov S.V., Shtork S.I., Skripkin S.G. and Kabardin I.K. An experimental investigation of the interaction between a pair of precessing vortices in a tangential vortex chamber. Journal of Physics: Conference Series 754. 2016. 022003. doi:10.1088/1742-6596/754/2/022003
3. Skripkin S.G., Dremov S.V. and Shtork S.I. Applying phase averaging technique to analysis of unsteady twin vortex structure observed in tangential vortex chamber. Journal of Physics: Conference Series 1382 (2019) 012042. doi:10.1088/1742-6596/1382/1/012042

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-19-00769).

УДК 536.1

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ ЦИЛИНДРОВ

Сероштанов В.В., Селезнева М.Д., Яковлева В.В., Князев С.А., Гусаков А.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Обтекание нагретых цилиндров различных сечений, установленных в различной конфигурации, относится к классической задаче из-за их распространённости в природе и технике. Исследователи рассматривают модель одного или нескольких цилиндров, с целью выявить влияние гидродинамического режима, геометрии системы, турбулентности набегающего потока, эффекты поджата [1] и другие факторы, приводящие к изменению гидродинамических сил и характеристик теплообмена. Наиболее востребованными на сегодняшний день являются экспериментальные и численные исследования, где параметры течения и теплообмена определяют в ходе единого эксперимента.

В работе рассмотрено обтекание трёх нагретых цилиндров диаметром 66 мм и длиной 600 мм, установленных в ряд. В ходе экспериментов варьировались скорость набегающего потока W и шаг установки цилиндров S_x и S_y (рис. 1).

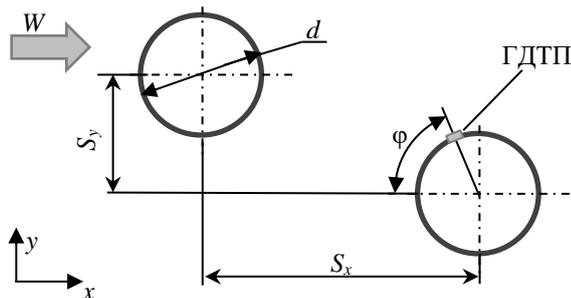


Рис. 1. Схема экспериментальной модели.

Нагрев цилиндров, выполненных из стального листа толщиной 0,1 мм, насыщенным водяным паром при атмосферном давлении обеспечивает постоянную температуру поверхности. На исследуемом цилиндре (втором) установлен градиентный датчик теплового потока (ГДТП) размерами 2,5×2,5×0,2 мм [2]. Исследуемый цилиндр проворачивается вокруг оси на угол φ от 0° до 180°, что позволяет получить зависимость плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи (КТО) от угла φ .

С помощью PIV получены поля скорости вблизи цилиндров, что позволяет связать картину течения с поведением параметров теплообмена. В работе использован PIV комплекс компании ПОЛИС [3].

Опыты проводились в дозвуковой аэродинамической трубе в диапазоне скоростей W от 0,5 до 8,4 м/с ($Re = 2400 \dots 40200$). Шаг S_x менялся от $2d$ до $5d$, а шаг $S_y = \pm d$: знак «+» соответствует случаю, когда первый по потоку цилиндр расположен выше второго относительно оси y (рис. 1). Измерены осреднённые по времени местные КТО на поверхности второго цилиндра и поле скорости W .

На рис. 2 совмещены распределения местного числа Нуссельта по второму цилиндру для $Re = 9600$ и $S_x = 2d$.

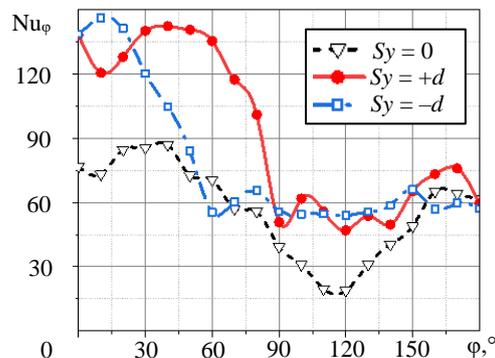


Рис. 2. Зависимость местного КТО от угла φ ($Re = 9600$, $S_x = d$).

Видны заметные отличия кривых: положение максимума и минимума КТО зависит от параметра S_x . При угле $\varphi > 150^\circ$ для всех трех случаев местный КТО примерно одинаков. Повышение КТО связано с тем, что именно в этой области цилиндр, стоящий ниже по потоку, взаимодействует с вихрем, сошедшим с первого (см. рис. 3).

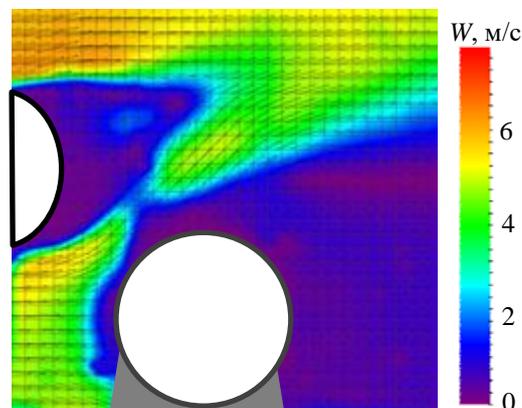


Рис. 3. Поле скорости вблизи второго цилиндра ($Re = 9600$, $S_x = 2d$, $S_y = +d$).

В работе установлено влияние вихреобразования на теплообмен нижестоящего цилиндра.

Список литературы:

1. Chakroun, W.M., et al. "The Effect of Surface Roughness on Flow Around a Circular Cylinder." *Wind Engineering*, vol. 21, no. 1, 1997, pp. 1–12, <http://www.jstor.org/stable/43750235>. Accessed 14 May 2022.
2. Основы градиентной теплотометрии. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. / СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 215 с.
3. Гусаков А.А., Греков М.А., Сероштанов В.В. Исследование обтекания и теплообмена на поверхности одиночного кольцевого ребра. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2018. Т. 11. № 2. С. 151 – 164.

ПРОДОЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Сиковский Д.Ф.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящей работе развитое турбулентное течение несжимаемой жидкости в плоском канале при больших числах Рейнольдса исследуется с помощью метода сращиваемых асимптотических разложений (САР). В традиционном варианте этого подхода [1] область течения разделяется на две характерных подобласти: прилегающая к стенкам внутренняя область, или вязкий подслой, толщина которого убывает с ростом числа Рейнольдса, и занимающая основную часть потока внешняя область. Для решения осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса используются асимптотические разложения для параметров потока по обратному числу Рейнольдса, при этом главные члены разложений в вязком подслое и внешней области определяются на основе достаточно общих соображений размерности и подобия без использования каких-либо полуэмпирических моделей замыкания. Кроме этого, постулируется наличие области перекрытия между внешней и внутренней областями, в которой справедливы как внешнее, так и внутреннее разложения. Условие сращивания для главных членов разложения средней скорости приводит к функциональному уравнению, решением которого является известный логарифмический закон скорости Прандтля–Кармана, с чем связано другое название области перекрытия – логарифмический слой [1]. В то время, как логарифмический закон скорости хорошо подтверждается многочисленными экспериментальными данными, результаты данного подхода для статистических моментов флуктуаций скорости согласуются с экспериментальными данными хуже. Так, согласно классической теории подобия характерным масштабом напряжений Рейнольдса во внутренней и внешней областях является напряжение трения на стенке, что противоречит имеющимся данным эксперимента и DNS, согласно которым величина пристенного максимума продольной компоненты напряжений Рейнольдса, отнесённой к напряжению трения, медленно (логарифмически) растёт с ростом числа Рейнольдса. Хотя характер и причины аномального скейлинга продольных напряжений Рейнольдса до сих пор являются предметами дискуссий, наиболее разумным его объяснением в настоящее время является гипотеза присоединённых вихрей Таунсенда (*attached eddy hypothesis*) [2]: в пристенной зоне $y \ll \delta$ (y – расстояние от стенки, δ – полуширина канала), определяющий вклад в нормальные и сдвиговые напряжения Рейнольдса вносят вихревые движения (присоединённые вихри) с характерным размером порядка y , в то время, как в продольную и трансверсальную компоненты напряжений Рейнольдса вносят вклад присоединённые вихри более широкого спектра размеров: от y и вплоть до наиболее крупных вихрей размером порядка δ . Возникающее при этом противоречие с классическими

гипотезами подобия, постулирующими независимость статистического режима пристенной турбулентности от внешнего масштаба длины δ , ещё предстоит разрешить в рамках будущей непротиворечивой теории пристенной турбулентности.

В отличие от традиционного подхода, в настоящей работе, следуя идее Лундгрена [3], метод САР применяется к анализу уравнений Навье–Стокса, описывающих мгновенную динамику пристенного турбулентного течения несжимаемой жидкости в плоском канале при больших числах Рейнольдса. В основу анализа взята классическая гипотеза подобия о том, что статистический режим турбулентности в непосредственной близости от стенки однозначно определяется напряжением трения на стенке и вязкостью («закон стенки»), и таунсендовский принцип подобия турбулентных течений по числу Рейнольдса во внешней области потока [2]. Определены главные члены асимптотических разложений мгновенной скорости потока во внешней и внутренней областях, и сформулированы условия их сращивания в логарифмическом слое. Впервые показано, что из условий сращивания помимо известного логарифмического закона скорости следует, что характерный продольный масштаб длины поля скорости превышает характерный поперечный и трансверсальный масштабы в $1/\varepsilon$ раз, где $\varepsilon = v_t/U_c$ – малый параметр, представляющий собой отношение динамической скорости к средней скорости потока на оси канала. Поле скорости имеет вытянутую в направлении потока структуру, при этом уравнения движения в главном приближении по малому параметру ε совпадают с уравнениями «2.5-мерной» модели пристенной турбулентности [4]. Полученный результат объясняет полосчатую структуру течения в пристенной турбулентности [5], неоднократно подтверждённую в многочисленных экспериментальных исследованиях и данных прямого численного моделирования. Получены выражения для корреляционных функций и спектров скорости и компонент тензора напряжений Рейнольдса в логарифмическом слое, согласующиеся с имеющимися экспериментальными данными и данными DNS.

Список литературы:

1. Panton R.L. Review of wall turbulence as described by composite expansions // *Appl. Mech. Rev.* 2005. V.58. P.1–36.
2. Townsend A.A. *The Structure of Turbulent Shear Flow*. Cambridge Univ. Press, 1976.
3. Lundgren T.S. Asymptotic analysis of the constant pressure turbulent boundary layer // *Phys. Fluids*. 2007. V.19. 055105.
4. Hatzivramidis D.T., Hanratty T.S. The representation of the viscous wall region by a regular eddy pattern // *J. Fluid Mech.* 1979. V.95. Pt.4. P.655–679.
5. Kline S.J. et al. The structure of turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.* 1971. V.50. Pt.1. P.133–160.

УДК 004.94, 533.6.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЕННОЙ ПЛАСТИНЫ В РАЗВИТОМ СВОБОДНО КОНВЕКТИВНОМ СЛОЕ

Филимонов С.А., Гаврилов А.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В работе исследуется динамика движения теплоизолирующей пластины, вызванного конвективными и тепловыми процессами, происходящими в замкнутом параллелепипеде, заполненном водой (см. рис. 1). Нижняя стенка параллелепипеда горячая, а верхняя холодная: в результате в объеме возникают конвективные течения, которое действует на пластину, и она начинает двигаться. Пластина имеет одну степень свободы и может двигаться только вдоль длинной стороны параллелепипеда. Математическая модель движения жидкости и пластины основана на методе погруженных границ [1], задача решена в двухмерной постановке. Более подробно постановка задачи и описание математической модели представлены в работе [2].

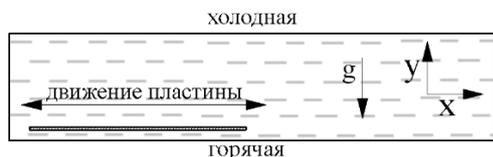


Рис.1 Постановка задачи

Проведено исследование режимов движения пластины в зависимости от числа Релея ($Ra = (g\beta\Delta T h^3) / (\nu\chi)$) где g – ускорение свободного падения, β – коэффициент объёмного расширения жидкости, ΔT – разность температур нижней и верхней стенок, h – высота параллелепипеда, ν – кинематическая вязкость и χ – температуропроводность) и величины d – отношение расстояния от дна до нижней поверхности пластины к высоте параллелепипеда.

Так же было проведено сравнение полученных результатов с экспериментальной картой режимов представленной в работе [3]. Расчеты качественно воспроизводят режимы течения пластины, полученные в эксперименте. Так при расположении пластины на расстоянии $d = 0,1h$ от дна наблюдаются периодические колебания частота, которых растет с ростом числа Релея (см. рис. 2а-в). С увеличением d устойчивость колебаний уменьшается, а при низких значениях числа Релея и вовсе пропадает (см. рис. 2г).

Отдельно было исследована зависимость теплового потока от выбранного режима. Исследовалось влияние наличия, положения и движения пластины на теплоотдачу (на число Нуссельта: $Nu = qh / (\lambda\Delta T)$ q – плотность теплового потока, λ – коэффициент теплопроводности жидкости). Результаты расчёта показали сильную зависимость теплового потока от глубины положения пластины, что согласуется с результатами расчётов для неподвижной пластины представленными в работе [4].

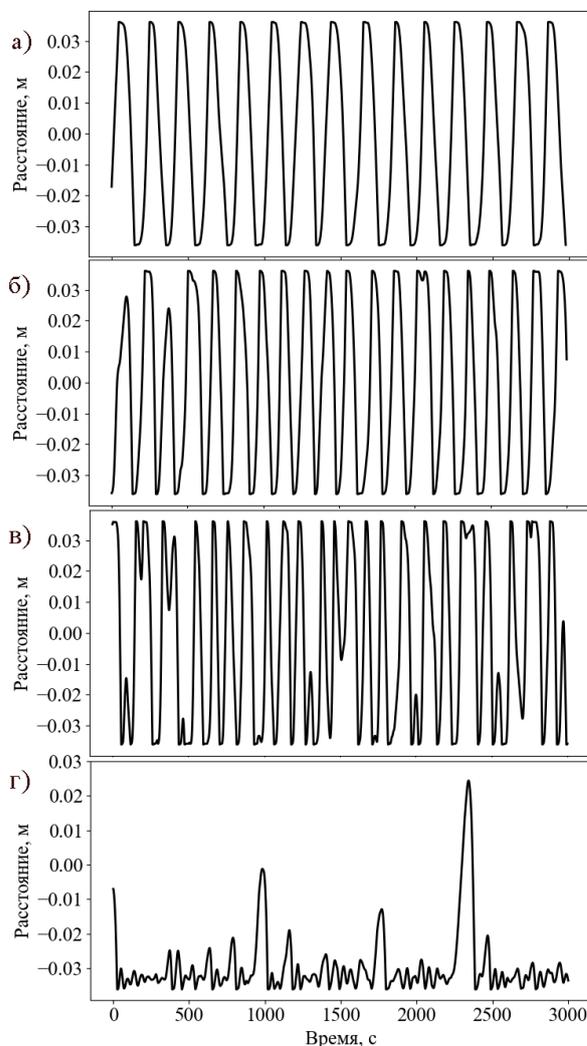


Рис. 2 Режимы движения пластины для разных вариантов: а) $Ra = 5e6$ и $d = 0,1h$; б) $Ra = 1e7$ и $d = 0,1h$; в) $Ra = 2e7$ и $d = 0,1h$; г) $Ra = 1e7$ и $d = 0,3h$.

Список литературы:

1. Mittal R., Iaccarino G. Immersed boundary methods // Annu. Rev. Fluid Mech. 2005. Т. 37, № 1. С. 239–261.
2. Филимонов С.А. и др. Математическое моделирование взаимодействия свободно-конвективного течения и подвижного тела // Вычислительная механика сплошных сред. 2023. Т. 16, № 1 SE-Статьи. С. 89–100.
3. Попова Е.Н. и др. Динамика конвективной системы с плавающим протяженным теплоизолятором // Вестник пермского университета. Физика. 2022. Т. 3. С. 38–47.
4. Vasiliev A.Y., Sukhanovskii A.N., Frick P.G. Influence of horizontal heat-insulating plates on the structure of convective flows and heat transfer in a closed cavity // Comput. Contin. Mech. 2022. Т. 15, № 1. С. 83–97.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-61-00098

УДК 533.6.01

ВЛИЯНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ИМПАКТНЫХ КРУГЛЫХ СТРУЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Импактные круглые струи хорошо зарекомендовали себя как один из недорогих, но высокопроизводительных методов нагрева, охлаждения или сушки поверхности. К примеру, их часто используют при сушке текстиля, пленки и бумаги; охлаждение электронного оборудования; отжиге стекла; обработке некоторых металлов; охлаждении газовых турбин и стенок камер сгорания, где тепловые условия наиболее тяжелые. При очевидном преимуществе высокого значения коэффициента теплопередачи в точке торможения, основным недостатком импактных струй является то, что локальный тепловой поток может быть сильно неравномерным. Поэтому важно определение как пикового, так и пространственного распределения теплопередачи для различных конфигураций струй и поверхностей.

К сожалению, о характере взаимодействия двух и более импактных струй пока результатов экспериментов и теоретических знаний недостаточно для полного понимания процесса теплопереноса. Это послужило основанием для проведения систематического экспериментального исследования при натекании двух и трех круглых импактных струй. Исследовалось влияние расстояния между соплами и расстояния до поверхности на распределение теплопередачи.

Данная работа была выполнена с помощью метода инфракрасной термографии. В экспериментах использовался предварительно осушенный и очищенный от примесей атмосферный воздух. Поток нагнетался из компрессора через расходомеры Bronkhorst с точностью 0,01 г/с в цилиндрические трубки, откуда в виде струи выходил перпендикулярно поверхности. Отношение внутреннего диаметра к длине трубки составляло 50, что обеспечивало на выходе из трубок развитый турбулентный профиль. Импактная поверхность была изготовлена из титановой фольги с размерами в плане 200x260 мм и толщиной 0,1 мм. Поверхность равномерно нагревалась регулируемым источником. Внутренний диаметр трубок D составлял 10 мм, а толщина стенки 1 мм. Расстояние между ними могло варьироваться с шагом 6 мм (s — расстояние между центрами соседних струй). Расстояние от струи до подложки регулировалось с помощью ручного однокомпонентного координатного устройства с шагом перемещения 0,2 мм (h — расстояние от струй до поверхности). Измерение температуры поверхности производилось с помощью тепловизора Testo с разрешением матрицы 1280x960 пикселей.

В результате проведенных исследований были сделаны следующие выводы: при расстоянии между соплом и преградой равной $h/D \leq 6$ образуются вторичные максимумы в теплоотдаче, связанные с максимумами турбулентности, значение второго максимума меньше, чем первого, как и в обзоре [1].

При расстоянии $s/d = 2,4$, вторичные максимумы образуются и между струями, тогда как при $s/d = 1,2$, $1,8$ — не образуются.

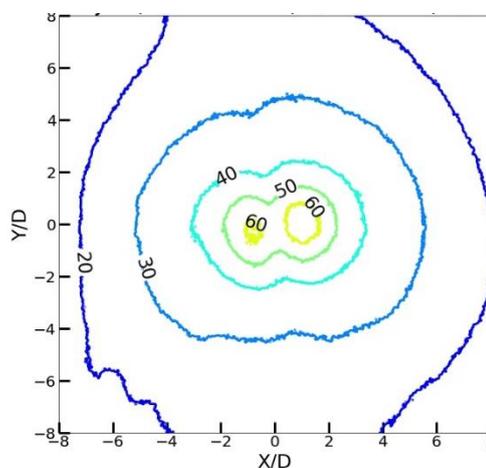


Рис.1. Распределение локального числа Nu для двух струй, $Re = 11000$, $s/D = 1.2$, $h/D = 10$.

Двух и трехструйное взаимодействие имеет существенные отличия при $s/d = 1.2$: центральная струя в трехструйном случае имеет в точке торможения более высокие числа локального Nu при $h/D \geq 0.5$, более того, основные максимумы не убывают с увеличением h/D вплоть до 6; по оси Y , убывание локального числа Нуссельта Nu для трех струй происходит медленнее, чем для двух струй (линия $Nu = 30$ для двух струй проходит через $Y/D = 4$, а для трех струй через $Y/D = 5$).

Список литературы:

1. Martin H. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces // Advances in heat transfer. Elsevier, 1977. Т. 13. С. 1-60.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации
(Соглашение № 075-15-2021-575)

УДК 536.24

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОРИСТЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА

Хайруллин А.Р., Хайбуллина А.И., Сиявин А.А.

Казанский государственный энергетический университет,
420066, Россия, Казань, ул. Красносельская, 51

Металлические пены с открытыми порами представляют собой высокопористые материалы с ячеистыми структурами, расположенными в случайном порядке. Несмотря на то, что имеется большее количество теоретических и экспериментальных исследований теплообмена в пористых структурах [1]. Теплообмен и характеристики потока в пористых структурах в основном исследуются при стационарном течении, при этом исследования с вынужденными нестационарными течениями ограничены. Вынужденные пульсации потока являются одним из методов интенсификации теплообмена. Эффективность пульсаций для интенсификации теплообмена показана во многих исследованиях [2]. Поэтому совместное применение пористых структур в условиях пульсирующего потока для интенсификации теплообмена представляет научный интерес.

Исследования пульсирующих течений в пористых структурах имеют ограниченный характер. Экспериментальные исследования осциллирующих течений в пористых структурах проводятся без циркуляции теплоносителя [3], что не позволяет сравнить их напрямую со стационарным течением. Численные исследования с использованием реалистичной трехмерной геометрии пористой среды может быть затруднительно, даже при стационарном течении (в случае больших расчетных областей). Поэтому численная симуляция пульсирующих течений в основном проводится на двухмерных моделях [4]. Однако, с развитием вычислительных систем, возможность моделирования трехмерных пористых структур в условиях пульсирующих течений повышается.

В данной работе проведено численное исследование теплогидравлических характеристик симметричных и несимметричных пульсаций на уровне отдельных пор, с учетом сложной трехмерной структуры пористого материала. Построение трехмерной структуры высокопористых пен осуществлялась путем трехмерных тесселяций Вороного.

Численное исследование проводилось при числе Рейнольдса 10, 25, 40 и 50. Рабочей средой служил воздух. Три пены были сгенерированы с пористостью 0,743, 0,864, 0,954 соответствующих диаметру фибр 6,5, 4,5 и 2,5 мм. Размер одной ячейки пены при всех пористостях составлял 25,4 мм. Для сокращения расчетного времени исследовалось влияние произведения безразмерной амплитуды пульсаций и числа Струхала, которое принимало значение 0,114, 0,191, 0,268 и 0,344. При всех расчетах частота пульсаций соответствовала 2 Гц. Расчетная область представляла собой прямоугольный канал с буферными зонами на входе и выходе. По центру канал располагалась пористая среда. Количество пор по направлению потока

соответствовала 10. Ширина и высота расчетной области составляла 1,6 диаметра от ячейки пены.

Численные исследования проводились с помощью Ansys Fluent. Дискретизация уравнений массы момента и энергии осуществлялась методом конечных объемов. На боковых гранях расчетной области задавалось условие симметрии. На стенках пены задавался постоянный тепловой поток. На входе в расчетную область постоянная температура 299,15 К. При стационарном случае на входе пористой среды принималась постоянная скорость, при пульсационном течении пульсации скорости. Количество элементов сеточного решателя, определенное в ходе тестовых расчетов, составило 1,8, 2,1 и 3,4 млн для пористостей 0,743, 0,864, 0,954 соответственно. Для верификации численного моделирования, число Нуссельта, полученное для стационарного течения при порозности 0,954, сравнивалось с экспериментальными данными других авторов.

Для всего исследованного диапазона, теплогидравлическая эффективность, основанная на факторе аналогий Рейнольдса (ФАР), была меньше одного. Увеличение интенсивности пульсаций приводило к уменьшению ФАР. Интенсификация теплообмена могла быть выше как при симметричных, так и несимметричных пульсациях. При этом ФАР был выше при несимметричных пульсациях потока, что связано с тем, что рост гидравлического сопротивления при симметричных пульсациях был выше. Отношение сопротивления выше при минимальном числе Рейнольдса, при этом отношение числа Нуссельта выше при максимальном числе Рейнольдса, поэтому увеличение числа Рейнольдса приводило к повышению ФАР. Максимальное значение ФАР для всех исследованных порозностей 0,743, 0,864, и 0,954 составило 0,37, 0,35 и 0,28 соответственно. Повышение порозности оказывало незначительный эффект на ФАР, в диапазоне порозностей от 0,743 до 0,864. При повышении порозности до 0,954 происходило снижение ФАР.

Список литературы:

1. Wang H., Guo L., Chen K. Theoretical and Experimental Advances on Heat Transfer and Flow Characteristics of Metal Foams // *Sci. China Technol. Sci.* 2020. Vol. 63. P. 705-718.
2. Ye Q., Zhang Y., Wei J. A comprehensive review of pulsating flow on heat transfer enhancement // *Appl. Therm. Eng.* 2021. Vol. 196 URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117275>
3. Bağcı Ö., Arbak A., De Paepe M., Dukhan N. Investigation of Low-Frequency-Oscillating Water Flow in Metal Foam with 10 Pores per Inch // *Heat Mass Transfer* 2018. Vol. 54. P. 2343-234
4. Dai Q., Yang L. LBM Numerical Study on Oscillating Flow and Heat Transfer in Porous Media // *Appl. Therm. Eng.* 2013. Vol. 54. P. 16–25.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 21-79-10406,
<https://rscf.ru/project/21-79-10406/>*

УДК 536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПУЧКЕ ТРУБ ПРИ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЯХ ПОТОКА**Хайруллин А.Р., Хайбуллина А.И.**Казанский государственный энергетический университет,
420066, Россия, Казань, ул. Красносельская, 51

Общеизвестно, что теплообменные аппараты влияют на технико-экономические показатели промышленных установок. Масса теплообменного оборудования в составе промышленных установок составляет львиную долю от массы установок в целом. Отсюда следует, что повышение эффективности процессов теплообмена может привести к энерго- и ресурсосбережению. Повышение энергоресурсоэффективности теплообменных аппаратов тесно связано с исследованиями современных методов интенсификации теплообмена. Одним из методов интенсификации теплообмена является вынужденная пульсация потока.

Теплообменные аппараты с трубными пучками широко распространены в составе промышленных установок. Несмотря на то, что возможность интенсификации теплообмена при вынужденных пульсациях потока показана во многих работах [1], исследования теплообмена в пучках труб при пульсирующих течениях ограничены. При этом пульсации в имеющихся работах имеют ограниченную амплитуду и симметричный характер пульсаций. Эффективность несимметричных пульсаций с возвратно-поступательными пульсациями показано в работах авторов [2].

В данной работе проведено экспериментальное исследование теплообмена в коридорном пучке в условиях возвратно поступательных пульсаций потока. Закономерности теплообмена исследованы для течения капельной жидкости, при числе Рейнольдса в диапазоне от 1200 до 2400 и числе Прандтля 4. Относительная безразмерная амплитуда пульсаций, отнесенная к диаметру трубки пучка, находилась в диапазоне от 5 до 15, частота пульсаций от 0,18 Гц до 0,45 Гц. Несимметричность пульсаций характеризовалась скважностью пульсаций и рассчитывалась как отношение первого полупериода пульсаций к общему периоду пульсаций. Скважность пульсаций находилась в диапазоне от 0,2 до 0,5.

Экспериментальные исследования пульсирующих течений в пучке труб проводились на испытательном теплообменнике, который представляет собой прямоугольный канал. По центру канала перпендикулярно набегаемому потоку расположен пучок труб. Количество рядов труб в пучке по ходу жидкости и в поперечном направлении восемь. Диаметр трубок 10 мм, относительный продольный и поперечный шаг 1,3. Интегральные характеристики внешней теплоотдачи всего пучка труб оценивались по тепловому балансу и уравнению теплопередачи. Тепловой баланс определялся по измеренным расходам теплоносителей и их температурам на входе и выходе из межтрубного и трубного пространства пучка труб. Внешняя теплоотдача пучка труб, для стационарного течения, верифицирована по критериальному уравнению А.А. Жука-

ускаса [3]. Теплоотдача внутри труб, в уравнении теплопередачи оценивалась по известным критериальным уравнениям, для соответствующих гидродинамических режимов течения.

Для создания низкочастотных несимметричных пульсаций, с возвратно-поступательным движением жидкости, используется пульсатор (устройство для передачи колебаний от системы генерации пульсаций к теплоносителю в испытательном теплообменнике). Пульсатор представляет собой обечайку с расположенным в нем поршнем. Пульсатор соединен общим штоком с пневмоцилиндром, который также имеет поршень. Движение поршня пульсатора с заданной амплитудой, частотой и скважностью осуществляется попеременной подачей сжатого воздуха в поршневую и штоковую полость пневмоцилиндра за счет контрольно-регулирующей пневмоаппаратуры. Следует отметить, что пульсатор с данным принципом работы позволяет генерировать характер пульсаций, не исследованный в научной литературе, не только в пучках труб, но и на других теплопередающих поверхностях.

Результаты экспериментальных исследований показали, что пульсационное течение может приводить к существенной интенсификации теплообмена в зависимости от режима пульсаций. Выявлена положительная взаимосвязь между интенсивностью пульсаций и внешней теплоотдачей коридорного пучка труб. Как с повышением частоты, так амплитуды пульсаций теплоотдача пучка труб возрастает. Скважность пульсаций, также оказывает влияние на теплоотдачу пучка труб. Увеличение несимметричности пульсаций приводит к повышению теплоотдачи. С увеличением интенсивности стационарного течения прирост теплоотдачи в пульсационном течении уменьшается. Максимальная интенсификация теплообмена наблюдается при числе Рейнольдса 1200 и режиме пульсаций соответствующей максимальной частоте и амплитуде пульсаций.

Список литературы:

1. Ye Q., Zhang Y., Wei J. A comprehensive review of pulsating flow on heat transfer enhancement // Appl. Therm. Eng. 2021. Vol. 196 URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117275>
2. Ilyin V.K. Haibullina A.I., Hayrullin A.R., Sabitov L.S. Thermal and hydraulic efficiency of the corridor tube bundle in conditions of pulsating flow of fluid // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2017. Vol. 240 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/240/1/012025>
3. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости / А.А. Жукаускас, Макарявичюс В.И., Шланчяускас А.А. Вильнюс: Изд. Мокслас, 1968. 192 с

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-29-00845,
<https://www.rscf.ru/project/23-29-00845/>*

УДК 621.224.7

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА НАСОС-ТУРБИНЫ**Чирков Д.В.¹, Скороспелов В.А.², Турук П.А.², Ригин В.Е.³, Устименко А.С.³**¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 4³ АО «Силовые машины», 195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, д.3, Лит. А

Работа посвящена оптимизационному проектированию формы рабочего колеса радиально-осевых насос-турбин (РОНТ) для гидроаккумулирующих электростанций. РОНТ может работать в двух режимах – турбинном и насосном. В турбинном режиме кинетическая энергия протекающей воды вращает рабочее колесо и затем с помощью генератора трансформируется в электроэнергию. При избытке электроэнергии в системе станцию переводят в насосный режим работы, при котором генератор вращает рабочее колесо турбины в противоположную сторону. В результате вода закачивается из нижнего бьефа в верхний бьеф гидроэлектростанции, запасая энергию для последующего использования.

Особенностью работы РОНТ турбин является не только наличие двух режимов работы, но и повышенные динамические нагрузки на лопасти рабочего колеса (РК) и лопатки направляющего аппарата вследствие их близкого расположения, а также сильное влияние кавитации на КПД как в турбинном, так и в насосном режимах работы. Таким образом, проточная часть насос-турбины должна удовлетворять большому числу противоречивых требований, что усложняет процесс её проектирования.

Современные методы вычислительной гидродинамики позволяют с достаточной точностью прогнозировать КПД, а также кавитационные характеристики РОНТ-турбин в отдельно взятом режиме. В настоящей работе предложен подход к автоматическому проектированию формы рабочего колеса на основе расчетов 3D потока и эволюционного метода решения задачи оптимизации.

Форма рабочего колеса задается 24 свободными параметрами, описывающими отклонение срединной поверхности лопасти от исходного варианта по угловой координате и в RZ-проекции [1]. Функция распределения толщины лопасти предполагается постоянной.

Рассмотрены две постановки задачи многоцелевой оптимизации. В первой используется 4 целевых функционала: максимизация КПД в расчетном турбинном (η_1) и в оптимальном насосном режимах работы (η_2), минимизация площади области кавитации на тыльной стороне лопасти в турбинном (A_{cav1}) и в насосном (A_{cav2}) режимах. В этом случае в ходе оптимизации все гидродинамические расчеты проводятся в бескавитационной постановке, область кавитации оценивается по распределению поля давления на тыльной стороне лопасти. Во второй постановке расчет КПД в насосном режиме η_2 ведется по модели двухфазной модели

кавитации «жидкость-пар». Это позволяет сократить число целевых функционалов до трех: η_1 , η_2 , A_{cav1} .

Для поиска решения оптимизационной задачи – фронта Парето – используется многоцелевой генетический алгоритм MOGA [2], требующий перебора нескольких тысяч вариантов геометрии РК. Для определения целевых функционалов в процессе оптимизации для каждого варианта геометрии проводится стационарный 3D расчет течения, в ходе которого численно решаются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, замкнутые $k\varepsilon$ -моделью турбулентности. Для численного решения уравнений используется отечественный пакет CADRUN [3]. Расчеты проводятся в циклической постановке в области, включающей направляющий аппарат, рабочее колесо и отсасывающую трубу.

Из полученных фронтов Парето выбраны несколько перспективных вариантов, для которых рассчитаны зависимости КПД от режима работы и от кавитационного коэффициента. Показано, что оптимизированные варианты рабочего колеса значительно превосходят исходный вариант по КПД как в турбинном, так и в насосном режимах работы, при сравнимых кавитационных показателях. На рис. 1 исходный вариант рабочего колеса сравнивается с одним из оптимизированных вариантов.

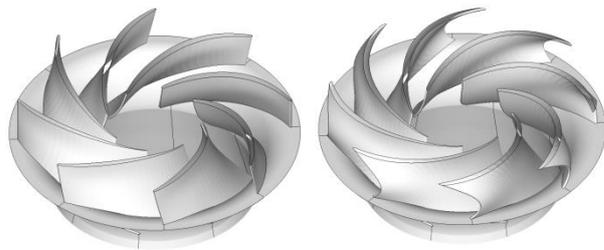


Рис. 1. Исходное и оптимизированное РК.

Список литературы:

1. Lyutov A.E., Chirkov D.V., Skorospelov V.A., Turuk P.A., Cherny S.G. Coupled Multipoint Shape Optimization of Runner and Draft Tube of Hydraulic Turbines // ASME J. of Fluids Eng. 2015. Vol. 137. Art. 111302.
2. Банников Д.В., Черный С.Г., Чирков Д.В., Скороспелов В.А., Турук П.А. Многорежимная оптимизация формы рабочего колеса гидротурбины // Вычислительные технологии. 2009. Т.14. № 2. С.32-50.
3. Численное моделирование течений в турбомашине / Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н., и др. Новосибирск: Наука, 2006. 202 с.

УДК 621.565.82

РЕГУЛИРУЕМАЯ ПОДАЧА ГАЗА В ПРОЦЕССЕ ОБЩЕГО КРИВОВОЗДЕЙСТВИЯ

Шакуров А.В.

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана,
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская, 5 к.1

Общее газовое криотерапевтическое воздействие (КВ) – это интенсивное охлаждение большей части поверхности тела человека характерной длительностью от 3 до 6 минут с целью достижения ответной реакции.

Недостаточная точность охлаждения биообъекта существенно влияет на потребительские характеристики: снижение температуры кожи и однородность ее охлаждения [1]. При охлаждении различных людей применяется один и тот же режим подачи газа. Это приводит к тому, что при одинаковой длительности КВ у различных людей достигается различная средняя температура поверхности и наблюдается значительная неоднородность в охлаждении торса и конечностей (более 10 К). Изменение длительности при этом не снимает проблемы неоднородности охлаждения. Кроме того, низкая энергетическая эффективность выполнения КВ существенно влияет на основной технико-экономический показатель – себестоимость. Анализ источников подводимой к азоту теплоты показал, что около 70% ее затрачивается на потери. Это связано с тем, что используются эмпирические условия подачи газа к человеку (скорость, направление потока, форма и расположение каналов), имеются высокие теплопритоки из-за недостатков конструкции.

Готовых решений вышеперечисленных проблем не было выявлено и было предложено изменить принцип создания оборудования для КВ от погружения объекта (человека) в хладоноситель к регулируемой его подаче к объекту с обратной связью по температуре поверхности. Однако, было выявлено, что неизвестны диапазоны и зависимости регулирования подачи газа для учета особенностей различных объектов охлаждения. Что отсутствуют методики расчета процесса КВ с достаточной детализацией охлаждения объекта, методики контроля.

Создан стенд, получены данные о динамике охлаждения, распределении температур газа и поверхности объектов (усредненно и с учетом наиболее охлаждаемых областей) в исполнительном устройстве типа «криобассейн» в нерегулируемом режиме длительностью от 180 до 420 секунд [2].

На основе результатов эксперимента разработаны трехмерные физико-математические модели и компьютерная программа моделирования процессов теплообмена в установке (учитывают взаимное влияние элементов конструкции и выявленные экспериментально особенности охлаждения объектов), позволяющие прогнозировать результат КВ [2].

Получены распределения температур, скоростей газа, тепловой поток от объектов охлаждения (различных по форме, размерам и структуре) в нерегулируемом режиме выполнения КВ.

На основе полученных результатов подготовлена концепция выполнения регулируемого по температуре объекта КВ. Подготовлено средство прогнозирования результата КВ и определен диапазон рациональных параметров подачи газа в исполнительное устройство установки для проведения, регулируемого КВ (от 40 до 70 г/сек, от -140 до 160 °С).

Создана и испытана установка, которая вместе со средством прогнозирования образует комплекс по исследованию и регулируемому выполнению КВ в широком диапазоне рабочих параметров. Разработаны алгоритмы выполнения регулируемых режимов КВ. Разработанная конструкция позволяет конфигурировать режим подачи газа согласно цели произвольного КВ, изменяя:

- (1) частоту вращения вентилятора от 10 до 50 Гц (расход газа);
- (2) расход жидкого азота от 10 до 20 гр./сек (расход и температура газа);
- (3) направление потока приточной струи;
- (4) длительность КВ.

В итоге решена проблема создания техники для более точного выполнения КВ. Результаты работы обеспечили повышение равномерности охлаждения до 5 К, снижение энергопотребления до 30%. Медицинские работники получили инструмент для проведения исследований КВ для решения медико-биологической проблемы повышения точности выполнения КВ. Решение этой проблемы и последующее внедрение изобретенных технических решений сделает возможным импорт-независимое лечебное и профилактическое применение индивидуализированного закаливания организма, в первую очередь необходимое людям, работающим в опасных экстремальных условиях. Его эффект заключается в снижении рисков при воздействии опасных факторов профессиональной деятельности, в повышении качества жизни и в увеличении производительности труда, что вносит значительный вклад в развитие страны в социально-экономических условиях XXI века.

Список литературы:

1. Шакуров А.В., Колышкин Л.М., Андреев Н.А. Состояние и перспективы развития технического обеспечения криотерапевтического воздействия // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020. Т. 47. № 3. С. 26-38.
2. Burkov I.A., Kolishkin L.M., Pushkarev A.V., Shakurov A.V., Tsiganov D.I., Zherdev A.A. Experimental and computational thermal analysis of partial-body cryotherapy // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. 183. № 122194.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00018).

УДК 536.24

ПЛОСКОПРАЛЛЕЛЬНЫЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛОПЕРЕНОС В ГАЗЕ

Шалаев В.И., С.Т. Калугин, Г.В. Толоко, В.А. Токарев

Московский физико-технический институт (Физтех),
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Плоскопараллельные течения сжимаемого газа в плоских или цилиндрических каналах представляют значительный интерес в аэромеханике как тестовые задачи, например, для анализа развития возмущений и ламинарно-турбулентного перехода, так и в практических приложениях. Известно достаточно большое количество работ, посвященное этой тематике. Точное решение получено только для аналога плоского течения Куэтта с движущейся со скоростью U нижней стенкой.

В настоящей работе рассмотрен достаточно широкий круг таких задач и получены их аналитические решения. Задачи рассмотренного типа описываются системой двух обыкновенных дифференциальных уравнений Навье-Стокса для продольной скорости и энтальпии в зависимости от одной пространственной переменной – поперечной координаты y . Главной особенностью течений сжимаемого газа является зависимость вязкости от температуры, что делает задачу нелинейной.

Показано, что в ряде случаев возможен первый аналитический интеграл этих уравнений, связывающий энтальпию h с продольной скоростью $u(y)$. Этот интеграл является аналогом соотношения Крокко для пограничного слоя, но возможен при произвольных числах Прандтля Pr . При наличии поперечного массопереноса с постоянной скоростью v этот интеграл имеет вид степенной функции продольной скорости

$$h(u) = a + bu + cu^2 + d(u + A)^{Pr} \quad (1)$$

Здесь постоянные коэффициенты являются функциями числа Прандтля, краевых условий и других параметров задачи.

Для $Pr = 1$ или обычного течения Куэтта эта формула упрощается:

$$h(u) = a + bu - Pr u^2 / 2 \quad (2)$$

Аналитическая зависимость энтальпии от скорости сводит задачу к одному интегралу для продольной скорости с постоянными $A < 0$ (напряжение трения на неподвижной стенке с обратным знаком) и B , которые находятся в процессе решения задачи из краевых условий:

$$f(u) = \int \frac{\mu(u) du}{u + A} = y + B \quad (3)$$

Здесь вязкость $\mu(u)$ определяется энтальпией, которая связана со скоростью соотношениями (1) или (2). При отсутствии поперечного массопереноса этот интеграл упрощается. Для нескольких задач течения воздуха, когда вязкость газа определяется законом Сатерленда, получены аналитические выражения для функции $f(u)$.

В общем случае задача сводится к численному вычислению интеграла (3) с определением в процессе итераций постоянной A . Следует отметить возможность наличия нескольких решений и их бифуркаций при критических значениях параметров. Проведены исследования рассмотренных задач и выявлены некоторые особенности течений и теплообмена, в частности, возникновение максимума температуры внутри канала при превышении скорости движения стенки U определенного критического значения.

На Рис. 1а и 1б приведены примеры распределений безразмерных скорости и температуры потока воздуха по безразмерной поперечной координате y/l (l – ширина канала) при изменении параметра $p_0 = h_0 / (\rho U^2)$, где отношения h_0 – энтальпия нижней движущейся стенки, ρ – плотность газа у стенки.

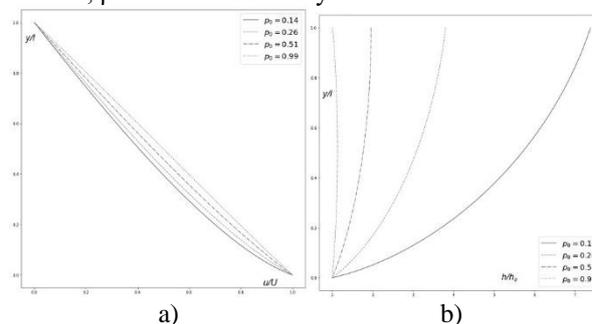


Рис. 1 Распределения скорости (а) и энтальпии (б) в канале

Подобные результаты получены для аналога течения Куэтта-Пуазейля в газе при наличии постоянного градиента давления и теплоизолированной покоящейся стенки. Для этого случая в формуле (2) $b = 0$ и интеграл (3) упрощается.

Проведены исследования и получены результаты для течения в кольцевой трубе между двумя соосными цилиндрами разной температуры, один из которых движется.

УДК 536.242

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА МИШЕНИ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНВЕКТИВНОМ МИКРОСТРУЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Шамирзаев А.С., Мордовской А.С., Кузнецов В.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Струйное охлаждение является актуальной технологией для охлаждения теплонапряженных элементов силовой электроники. Использование затопленных импактных микроструй является одним из наиболее эффективных методов охлаждения теплонапряженных поверхностей [1]. В современных исследованиях активно исследуется влияние таких параметров как диаметр струи, скорость охлаждающей жидкости в струе, расстояние между струями и до охлаждаемой поверхности. В работе [2] проведено исследование охлаждения свободными струями нагревателя большой площади, 189 см², и проведен анализ возможности масштабирования результатов полученных при охлаждении нагревателей меньшей площади. В то же время, исследования посвященные возможности масштабирования результатов исследований при охлаждении импактными затопленными микроструями для охлаждения объектов с различной площадью тепловыделения практически отсутствуют.

В данной работе проведено экспериментальное исследование теплообмена при охлаждении водой теплонапряженных поверхностей с площадью 0.79 и 0.50 см², с использованием решетки из 36-ти сопел формирующих затопленные микроструи диаметром 174 микрона. Сопла на решетке вписаны в окружность 7 мм диаметром и имеют квадратную симметрию с шагом 1 мм. Охлаждаемые поверхности (мишени) – торец медного нагреваемого цилиндра диаметром D равном 8 мм и 10 мм. Расстояние от решетки формирующей микроструй до охлаждаемой поверхности формирует горизонтальный щелевой канал высотой 1 мм. Температура охлаждающей воды 16-18 С. Схема экспериментальной установки и методика эксперимента подробно описана в [3].

Эксперименты проведены в диапазоне массовых расходов от 2 до 10 г/сек при тепловых потоках до 650 Вт/см². Экспериментальные данные приведены для условий однофазной конвекции, когда максимальная температура стенки не превышает 88 С.

При равномерном орошении мишени с D=8мм перегрев температуры стенки является линейной функцией теплового потока, коэффициент теплоотдачи не зависит от величины теплового потока во всем исследованном диапазоне. При увеличении диаметра мишени до 10мм, при тепловом потоке выше 300 Вт/см² наблюдается ухудшение теплоотдачи. При одинаковой скорости в струях для мишени меньшего диаметра наблюдаются значительно более высокие коэффициенты теплоотдачи, рис 1а. Это связано с более высокой и равномерной плотностью орошения поверхности Г. В то же время, увеличение скорости в струях при охлаждении мишени диаметром 10 мм до значений, соответствующих плотности орошения мишени

диаметром 8 мм, не даёт такой же интенсификации, рис.1б.

Показано, что увеличение площади охлаждаемой поверхности и неравномерное орошение охлаждаемой поверхности уменьшают эффективность теплообмена при сохранении плотности орошения охлаждаемой поверхности.

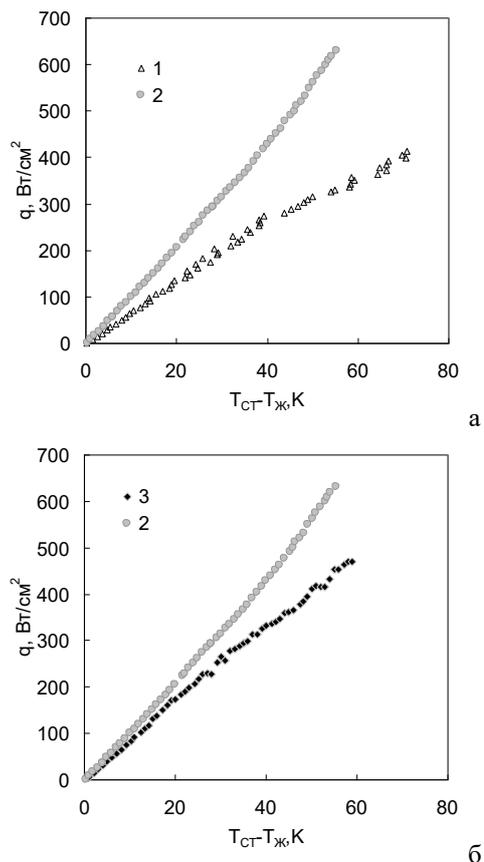


Рис.1. Зависимость снимаемого теплового потока от перегрева температуры стенки.

(а) V струй=7,4 м/с, (б) Γ = 12,6 г/см²сек; 1- D =10мм V =7,4 м/с, 2- D =8мм V =7,4 м/с, 3- D =10мм V =11,5 м/с.

Список литературы:

1. Mudawar I. Assessment of high-heat-flux thermal management schemes // IEEE transactions on components and packaging technologies. 2001. Т. 24. №. 2. С. 122-141.
2. Bhunia A., Chen C. L. On the scalability of liquid microjet array impingement cooling for large area systems // Journal of heat transfer. 2011. Т. 133. №. 6.
3. Кузнецов В.В., Шамирзаев А.С., Мордовской А.С., Влияние расположения затопленных импактных микроструй на конвективный теплообмен при охлаждении теплонапряженной поверхности водой и диэлектрической жидкостью // Письма в ЖТФ 2023 Т. 49 №. 2, С 30-33.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №21-19-00626 (<https://rscf.ru/project/21-19-00626/>)

СЕКЦИЯ 3

Методы управления турбулентностью и интенсификация теплопереноса

УДК 532.526

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ V-ОБРАЗНОЙ МОДЕЛИ ЛЕТАЮЩЕГО КРЫЛА С ОРГАНАМИ УПРАВЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

Алпацкий Н.С., Павленко А.М., Мельник Е.А., Каприлевская В.С., Занин Б.Ю.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Для управления и маневрирования летательным аппаратом используют различные вариации органов управления: рули, элероны, элероны-интерцепторы, триммеры и управляемый стабилизатор. Так как остается открытым вопрос об эффективности работы органов управления при различных режимах полета, то исследование их влияния на обтекание крыла является новой и актуальной задачей для ученых.

С развитием авиации активно продвигается концепция использования распределенной силовой тяги. Причина применения выражается в улучшении аэродинамических характеристик летательного аппарата [1]. Основная концепция распределенной силовой тяги заключается в том, что компоненты летательного аппарата, создающие тягу, теперь полностью интегрированы в планер летательного аппарата. Представленное экспериментальное исследование направлено на изучение влияния работы распределенной силовой установки на вихревую структуру течения в пограничном слое на V-образной модели малоразмерного ЛА с органами управления.

Настоящая работа имеет две цели исследования. Первая связана с изучением влияния органов управления на изменение структуры течения на поверхности V-образного крыла. Вторая заключается в получении данных о воздействии на обтекание модели распределенной силовой установкой в рабочем состоянии.

Эксперименты проходили в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324, которая находится в ИТПМ им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск). Рабочая часть трубы имеет прямоугольную форму длиной 4 м и площадь сечения 1 м² (1x1 м). Уровень турбулентности потока менее 0,04%. Т-324 предназначена для экспериментов при малых дозвуковых скоростях потока – примерно 70 м/с.

Для получения качественных данных о структуре течения на поверхности модели использовался метод «саже-масляных» покрытий. Суть метода заключается в применении смеси порошка оксида титана и керосина. Полученный состав наносился на верхнюю поверхность крыла, затем модель устанавливалась в трубу и высыхала под действием набегающего потока. По итогу получались осредненные по времени картины течения.

Измерение скорости потока и его пульсаций проводилось с помощью термоанемометра. Данное устройство позволяет с высокой точностью измерить большое количество необходимой информации, например, значение мгновенной скорости и координаты в интересующих точках.

Параметры, при которых проходили эксперименты: скорость набегающего потока 15 и 25 м/с, углы атаки 0,5, 15, 18, 20 градусов. Органы управления отклонялись вверх и вниз на 30 градусов.

Используемая базовая модель имела форму летающего крыла в плане. Хорда крыла составляла 250 мм, размах – 750 мм. Угол между передними кромками – 112,62°. За моделью на специальной державке располагалась распределенная силовая установка, которая представляла собой 6 двигателей (импеллеров). Силовая установка была подключена в электрическую сеть и работала на максимальных оборотах. Двигатели имели два варианта расположения за моделью: первое – над самим крылом, второе – ось вращения рабочего колеса располагалась на уровне задней кромки.

По итогу проведения серии экспериментов на V-образной модели были получены следующие результаты:

- картины визуализации влияния органов управления на структуру течения V-образного крыла на различных режимах полета;
- профили скоростей по хорде, кривые нарастания пульсаций, распределение пульсаций в зависимости от координат X и Y, спектры;
- картины визуализации влияния работы распределенной силовой тяги на структуру течения на крыле;

Также был проведен поиск возможностей управления обтеканием с помощью различных возмущений на поверхности модели.

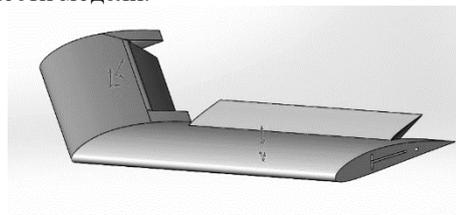


Рис. 1. 3-D Модель V-образного крыла

Список литературы:

1. Marcus E.A.P., R. de Vries, A. Raju Kulkarni and Veldhuis L.L.M., Aerodynamic Investigation of an Over-the-Wing Propeller for Distributed Propulsion // AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018. DOI: 10.2514/6.2018-2053
2. Павленко А.М., Занин Б.Ю., Катасонов М.М. Исследования обтекания модели летающего крыла при натуральных числах Рейнольдса // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2015. Т. 10. №. 3. С. 19–25. Суржиков С.Т. Перенос излучением в неоднородном слое // ТВТ. 1997. Т. 35. № 3. С. 1-2.
3. Alpatskiy N.S., Pavlenko A.M., Bykov A.V., Zanin B.Y. Investigation of the influence of controls on the flow around the UAV model // The XXXVII Siberian Thermophysical Seminar (STS37) 2021

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-29-00309,
<https://rscf.ru/project/22-29-00309/>

УДК 536.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ОРЕБРЕНИЕМ, РАСПОЛОЖЕННЫМ ПОД УГЛОМ К ПОТОКУ

Барсуков А.В., Терехов В.В., Терехов В.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Отрывные турбулентные течения являются одними из самых распространенных явлений в гидродинамике. Они возникают при обтекании вихрегенераторов различных форм в виде ступенек [1], ребер [2] и т.д. Изучение отрывных течений является важной задачей во многих областях науки и техники и работы данного направления имеют важное практическое значение в энергетике. Такие течения реализуются во многих технологических устройствах, таких как теплообменное оборудование, элементы авиационно-космических аппаратов, вентиляционные системы, и т.п. Исследование отрывных течений позволяет оптимизировать геометрию и повысить теплогидравлические показатели этих устройств.

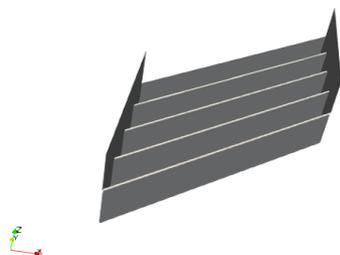


Рисунок 1. Схема расчетной области.

В настоящей работе был выполнен ряд численных экспериментов по моделированию турбулентного течения в канале со стенкой, имеющей периодическое поперечное оребрение. Число Рейнольдса определялось на основе средней скорости потока и высоты канала составляло 5 000 – 20 000. Угол наклона ребер относительно потока варьировался от 30° до 90°. На Рис.1 показана модель расчетной области, которая включала четыре подканала на оребренной части стенки. Было исследовано два варианта граничных условий. В первом случае на боковых гранях были установлены периодические граничные условия, что позволяло избегать влияния боковых стенок. Во втором случае в расчетной области боковые грани были стенками. На нижней стенке канала был задан постоянный тепловой поток.

Для проведения численного моделирования был использован метод Large Eddy Simulation (LES) с использованием модели турбулентности Смагоринского. Для интегрирования уравнений, содержащихся в математической модели, был применен метод контрольного объема второго порядка точности по пространству и времени. Для реализации данного метода

были использованы решатели `pimpleFoam/cyclic Pimple Foam`, входящие в состав пакета `OpenFoam`.

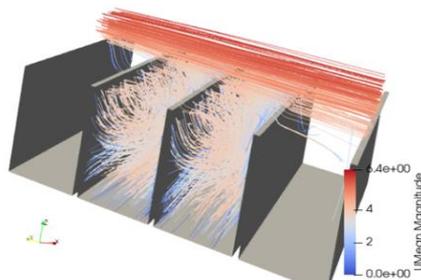


Рисунок 2. Структура течения в случае циклических граничных условий на боковых гранях.

В результате проведенного моделирования получены данные о структуре отрывного обтекания ребер при варьировании угла их ориентации к набегающему потоку. Подробно проанализированы локальные и интегральные характеристики, отмечено отличие структуры течения для двух различных граничных условиях (рисунок 2-3). Представлены данные о теплоотдаче от оребренной поверхности.

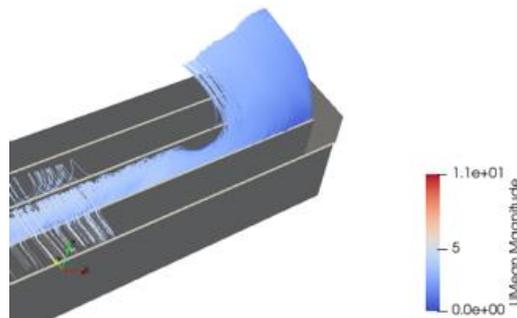


Рисунок 3. Структура течения в случае циклических граничных условий на боковых стенках.

Список литературы:

1. Rashidi S., Hormozi F., Sundén B., Mahian O. Energy saving in thermal energy systems using dimpled surface technology — A review on mechanisms and applications // *Applied Energy*. 2019. V. 250, pp. 1491–1547.
2. Zheng S.-F., Liu G.-Q., Lian W.-K., Yang Y.-R., Gao S.-R., Sunden B., Wang X.-D. Fluid flow and heat transfer in a rectangular ribbed channel with a hierarchical design for turbine blade internal cooling // *Applied Thermal Engineering*. 2022. V.127. 119183

Работа поддержана РФФ (грант № 21-19-00162)

УДК 532.526

**ПОЛОЖЕНИЕ ПЕРЕХОДА НА СТРЕЛОВИДНОМ КРЫЛЕ
ПРИ НАЛИЧИИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ШЕРОХОВАТОСТИ****Бойко А.В., Бородулин В.И., Иванов А.В., Мищенко Д.А.**Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская 4/1

Оптимизация аэродинамических характеристик существующих и перспективных летательных аппаратов требует решения ряда задач механики жидкости и газа. Они сводятся к изучению гидродинамических процессов, протекающих у поверхности обтекаемых потоком тел и разработке на основе полученных знаний новых методов воздействия на локальные и интегральные характеристики течений. В результате становится возможным улучшение несущих свойств крыльев и снижение сопротивления движущихся в атмосфере объектов, оптимизируется теплоперенос у поверхностей, обтекаемых потоком тел. В целом, управление течениями служит повышению экономичности и эксплуатационных свойств летательных аппаратов различного назначения. Известно, что при дозвуковых скоростях около половины полного сопротивления современного коммерческого самолета составляет сопротивление трения [1]. Уменьшение этой составляющей по-прежнему остается сложной научной проблемой, которая еще далека от решения особенно для реальных практических приложений. Поэтому уменьшение трения - один из наиболее перспективных путей улучшения эффективности летательного аппарата, что дает возможность увеличить дальность и полезную нагрузку, снизить затраты на топливо, уменьшить прямые эксплуатационные расходы и снизить экологическую нагрузку.

Одним из возможных решений этой задачи для стреловидных крыльев является гибридная ламинаризация с применением локального отсоса пограничного слоя вблизи передней кромки (для подавления вихрей неустойчивости поперечного течения или НПТ в наиболее активной фазе) совместно с оптимизацией формы профиля крыла ниже по потоку.

Однако, организация активного отсоса через перфорированную обшивку передней кромки, является сложной технической и технологической задачей, утяжеляет и удорожает крыло, существенно затрагивает его внутреннюю структуру. Подобными технологическими недостатками, связанными с усложнением конструкции крыла, обладает и другой известный способ ламинаризации с воздействием на пограничный слой стреловидного крыла с помощью диэлектрического барьерного разряда. Кроме требуемой высокой энергии, особенностью этого подхода является и достаточно большое количество паразитных возмущений, вводимых в пограничный слой, вследствие чего добиться положительного влияния на ламинарно-турбулентный переход (ЛТП) не всегда удается даже в лабораторных условиях.

С учетом вышесказанного практически более реализуемым методом управления авторам представляется управление с помощью различных отдельных элементов и/или специального рельефа на обтекаемой

аэродинамической поверхности. Эти методы не требуют подвода энергии и вмешательства в конструкцию крыла.

Недавно был разработан оригинальный метод ламинаризации течения в пограничном слое стреловидного крыла с помощью риблетоподобного рельефа поверхности. Суть метода состоит в нанесении на поверхность стреловидного крыла рельефа, состоящего из выступающих над поверхностью полос, параллельных передней кромке крыла, либо наклонных к потоку под углом большим, чем угол стреловидности передней кромки. Вследствие наклонного обтекания потоком граней рельефа, около поверхности стреловидного крыла индуцируется пристеночное течение, направленное навстречу поперечному течению и ослабляющее его. В результате НПТ снижается и переход к турбулентности затягивается. В работе [2] авторы теоретически показали, что стационарные вихри НПТ могут быть стабилизированы или дестабилизированы в зависимости от угла наклона граней рельефа к местной невязкой линии тока. В работе [3], выполненной в аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН, это было подтверждено экспериментально. В работе [4] удлинение ламинарного участка было подтверждено с помощью тепловизионной методики на модели стреловидного крыла СК-45, а его толерантность к изменению параметров потока (робастность) была подтверждена при вариации скорости набегающего потока на $\pm 10\%$. Однако интегральная эффективность этого метода по сопротивлению трения на ламинарном, переходном и турбулентном участках пограничного слоя не была рассмотрена.

Другим активно исследуемым подходом к управлению в последние два десятилетия является метод генерации в пограничном слое вихрей НПТ с помощью распределенных дискообразных наклеек микронных высот (Distributed Roughness Elements - DRE), расположенных на передней кромке крыла [5]. Возбуждаемые таким образом управляющие вихри активно нарастают вниз по потоку, а затем их рост выходит на насыщение на высоких амплитудах, не вызывающих ЛТП (на «докритических» амплитудах). Многочисленными трубными экспериментами и расчетами установлено, что нарастание наиболее опасных («критических») вихрей, способных вызвать ЛТП, в этом случае подавляется и переход к турбулентности может быть затянут. К выявленным критическим недостаткам метода DRE относятся низкая повторяемость результатов управления, в частности связанная и со способом генерации управляющих вихрей наклейками толщиной ~ 10 мкм. Так как управляющие вихри имеют низкую начальную амплитуду, а необходимые для достижения эффекта амплитуды вихрей достигаются за счет естественной неустойчивости течения, то

при небольшом изменении летных параметров (скорости полета, угла атаки крыла), вихри могут не достигать требуемых амплитуд для наступления положительного эффекта, либо перерасти требуемые амплитуды и сами выступить источником более ранней турбулизации [6]. В обзоре 2019 г. [7] авторы метода DRE отмечают, что из 112 проведенных летных экспериментов положительный эффект был достигнут только в 6, поэтому они рекомендуют отложить дальнейшие летные эксперименты и сосредоточиться на более детальном исследовании предложенного механизма управления с привлечением особенного внимания к геометрии управляющих элементов поверхности, их положению и ориентации и к качеству набегающего потока. Именно этим аспектам в данной работе и уделяется особое внимание.

В качестве объекта исследования для отработки методов воздействия (управления) на положение ЛТП выбрана модель стреловидного крыла СК-45 с углом стреловидности 45 градусов [4, 6, 8]. В проведенных в аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН модельных экспериментах варьировалась скорость набегающего потока, искусственная шероховатость (наклеиваемые элементы из адгезивной пленки) на поверхности стреловидного крыла, положение наклеиваемых элементов и их протяженность на модели. Интегральные результаты воздействия шероховатости (рельефа) поверхности на структуры пограничного слоя и на положение ламинарно-турбулентного перехода регистрировались с помощью тепловизора научно-исследовательского класса и оригинального метода высокоинформативной количественной постобработки тепловизионных данных [8].

Список литературы:

1. Arnal D., Archambaud J.P. Laminar-Turbulent Transition Control: NLF, LFC, HLFC, Advances in Laminar-Turbulent Transition Modeling, AVT-151 RTO AVT/VKI, Lecture Series, von Kármán Inst. for Fluid Dynamics, Rhode St. Genèse, Belgium, 2009.
2. Ustinov M.V., Ivanov A.V. Cross-flow dominated transition control by surface micro-relief, in International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018), AIP Conf. Proc. Vol. 2027, pp. 020013 (2018).
3. Ivanov A.V., Mischenko D.A., Ustinov M.V. Experimental investigation of laminar-turbulent transition control on swept-wing with help of oblique surface non-uniformities, in International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018), AIP Conf. Proc. Vol. 2027, pp. 030152 (2018).
4. Ivanov A.V., Mischenko, D.A. Delay of Laminar-Turbulent Transition on Swept-Wing with Help of Sweeping Surface Relief. AIP Conf. Proc. Vol. 2125, pp. 030041 (2019).
5. Saric W.S., Carrillo Jr. R.B., Reibert M.S., Leading-Edge Roughness as a Transition Control Mechanism, AIAA Paper 1998-0781, 1998.
6. Kachanov Y.S., Borodulin V.I., Ivanov A.V. Transition experiments with controlled freestream turbulence level and controlled acoustic perturbations. Technical Report. RODTRAC project TR D4.3 (2015).
7. Saric W.S., West D.E., Tufts M.W., Reed H.L. Experiments on Discrete Roughness Element Technology for Swept-Wing Laminar Flow Control. AIAA J. 1–14 (2019).
8. Boiko A.V., Ivanov A.V., Borodulin V. I., Mischenko D. A. Quantification technique of transition to turbulence in boundary layers using infrared thermography. Int. J. Heat Mass Transf. Vol. 183, pp. 122065 (2022).

*Работа выполнена при поддержке РФФ
(грант 23-19-00644)*

УДК 532.526

ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВДУВА/ОТСОСА ИЛИ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

Бойко А.В., Кириловский С.В., Поплавская Т.В.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4

Моделирование ламинарно-турбулентного обтекания (ЛТО) аэродинамических конфигураций является важной научной и практической задачей, поскольку от положения ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) и его протяжённости зависит экономичность летательных аппаратов. Управление пограничным слоем (ПС) позволяет повысить эффективность летательного аппарата, например, существенно снизить его сопротивление за счет задержки ЛТП в ПС. Для дозвуковых течений активно исследуемыми способами управления являются, вдув или отсос потока через обтекаемую поверхность [1] (активное управление) и воздействие в виде дискретных элементов шероховатости (структурированный рельеф поверхности) [2,3] (пассивное управление).

Ранее авторами было проведено численное моделирование ламинарно-турбулентного обтекания скользящего крыла в виртуальной аэродинамической трубе (Рис. 1) на базе интеграции пакета ANSYS Fluent и программного комплекса LOTRAN 3 [4]. В рамках этой вычислительной технологии решаются две задачи: 1) расчет ламинарного обтекания модели с помощью программного комплекса ANSYS Fluent (получение характеристик основного течения), и 2) анализ устойчивости профилей основного течения с использованием программного комплекса LOTRAN 3 с получением распределений N -факторов нарастания возмущений на обтекаемой поверхности.

В настоящей работе проведено исследование влияния трехмерных источников вдува и отсоса и различных элементов рельефа поверхности как на устойчивость ПС стреловидного крыла, так и на распределения N -факторов для различных механизмов ЛТП, необходимых для определения положения перехода в рамках eN-метода.

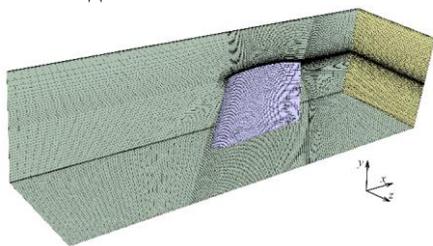


Рис. 1.

Моделирование таких источников возмущений в рамках программного комплекса ANSYS Fluent проводилось с помощью геометрического выделения поверхности воздействия в отдельную зону со своим ID и построением подробной расчетной сетки, и далее заданием условия на давление (pressure inlet для вдува и pressure outlet для отсоса) на этой выделенной поверхности или заданием условия wall на выделенных элементах рельефа поверхности.

В качестве области воздействия вдува/отсоса рассматривалась четырехугольная щель на верхней поверхности модели (выделена красной линией на Рис. 2). Результаты расчетов показали, что вдув/отсос существенно изменяет свойства устойчивости ПС сразу за областью воздействия. В качестве примера на Рис.2 приведены картины изоповерхностей N -факторов неустойчивости вихрей поперечного течения (а – без воздействия, б – отсос) для случая $U_\infty=30\text{м/с}$, $\alpha=-5^\circ$.

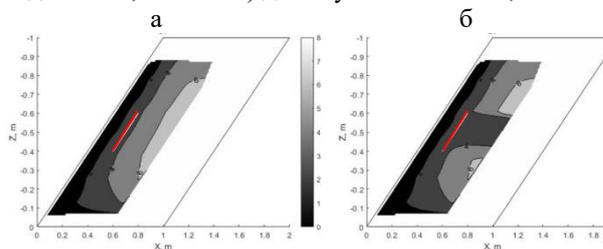


Рис. 2.

В качестве элементов рельефа поверхности рассматривались параллелепипеды шириной по всему размаху крыла, высотой не более трети толщины вытеснения ПС, расположенные параллельно или под углом к передней кромке крыла на разных расстояниях от 10% до 30% хорды (Рис.3).

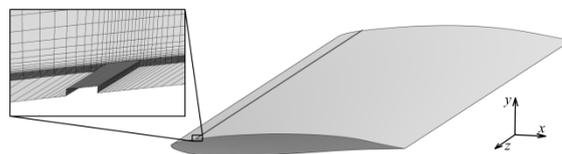


Рис. 3.

В случае пассивного способа управления с помощью структурированного рельефа поверхности проводятся расчеты по выявлению оптимальных параметров структур и их расположения для стабилизации течения на стреловидном крыле.

Список литературы:

1. Kornilov V.I., Boiko A.V. Flat-plate drag reduction with streamwise noncontinuous microblowing // AIAA J. 2014. V. 52, No. 1, P. 93–103.
2. Saric et al. Stability and Transition of Three-Dimensional Boundary Layers // Annual Reviews of Fluid Mechanics. 2003. V. 35. P.413–440
3. Kurz H., Kloker M.J. Mechanisms of flow tripping by discrete roughness elements in a swept-wing boundary layer // JFM. 2016. V. 796. P. 158–194.
4. Boiko A.V., Demyanko K.V., Kirilovskiy S.V., Nечepurenko Y.M., Poplavskaya T.V. Modeling of transonic transitional 3D flows with a general-purpose CFD code using the eN-method // AIAA J. 2021. V. 59, № 9. P. 3598–3610

Работа выполнена при поддержке РФФ
(Проект № 23-19-00644)

УДК 532.526.3

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПО РАЗМАХУ КАНАВОК И ЗАВИХРЕННОСТИ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА НА ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО КРЫЛА

Бородулин В.И., Иванов А.В., Качанов Ю.С.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Современные крылья имеют развитую механизацию. Сочленения предкрылков, закрылков и элеронов с центральной частью представляют собой ориентированные по размаху канавки, которые могут оказывать существенное влияние на переход к турбулентности в пограничном слое крыла. Режим течения (ламинарный или турбулентный), в свою очередь, определяет одну из ключевых характеристик крыла, величину вязкого трения.

В данной работе влияние ориентированных по размаху канавок на переход к турбулентности в пограничном слое скользящего крыла изучалось экспериментально на модели, установленной в рабочей части малотурбулентной аэродинамической трубы Т-324 ИТПМ СО РАН. Модель состояла из плоской пластины, тела вытеснения над ней, задающего распределение давления, и двух профилированных боковых стенок, обеспечивающих однородность среднего течения по размаху. Течение над моделью было таким, как на крыле бесконечного размаха с углом скольжения 35° . Среднее течение и положения начала перехода к турбулентности измерялись термоанемометром. Подробнее работа с данной моделью описана в статье [1].

Канавки, однородные по размаху, располагались вблизи передней кромки. Профиль их был прямоугольный, ширина и глубина варьировались в широких пределах.

Известно, что в трёхмерных пограничных слоях неоднородные по размаху особенности поверхности скорее инициируют на переход, чем однородные (см., например, [2]). Однако при завихренности набегающего потока течение даже над идеально ровными канавками теряет однородность. Для установления возможного влияния завихренности набегающего потока на переход в присутствии канавок, перед моделью устанавливались турбулизирующие сетки двух типов. Одна из них генерировала преимущественно стационарные вихри, а вторая — бегущие.

Всего было изучено 96 режимов, отличающихся скоростью набегающего потока, параметрами канавки и типом турбулизирующей сетки. Единичные числа Рейнольдса в набегающем потоке лежали в диапазоне от $492 \cdot 10^3$ до $1492 \cdot 10^3$. Глубины канавок, обезразмеренные на местную толщину вытеснения, варьировались от 62 до 833, а ширины (в направлении хорды) — от 252 до 3291.

В зависимости от параметров, переход был либо эволюционным (через рост волн неустойчивости поперечного течения) и происходил заметно ниже по потоку от канавки, либо внезапным, практически сразу за канавкой. В пространстве параметров эти два случая занимают две отдельные области, см. рис. 1 и 2.

Отметим, что, в данном эксперименте, завихренность набегающего потока не оказалась в числе значимых параметров. Установка любой из сеток не влияла на положение перехода и не меняла переход с эволюционного на внезапный или наоборот.

Пока ширина и глубина канавки не выходят за некоторые границы, показанные на рисунках, присутствие канавки практически не сказывается на эволюции волн поперечного течения и, соответственно, на положении начала перехода.

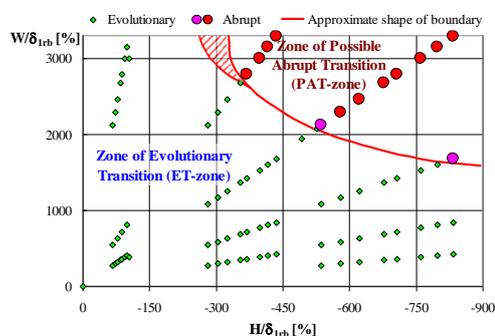


Рис. 1. Сценарии перехода в зависимости от ширины W и глубины H канавки. Оба параметра нормированы на местную толщину вытеснения d_{1rb} . Эволюционные режимы — ромбики, внезапный переход — кружки.

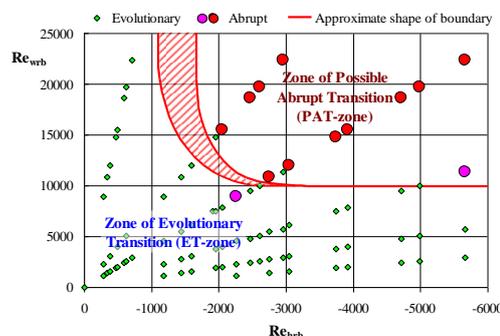


Рис. 2. Сценарии перехода в зависимости от чисел Рейнольдса, вычисленных по ширине и глубине канавки (Re_{wrb} и Re_{hrb} , соответственно). Эволюционные режимы — ромбики, внезапный переход — кружки.

Список литературы:

1. Borodulin V.I., Ivanov A.V., Kachanov Y.S. Swept-wing boundary-layer transition at various external perturbations: Scenarios, criteria, and problems of prediction // *Physics of Fluids*. 2017. Vol. 29, pp. 094101-1 – 094101-26.
2. Rius-Vidales A.F., Kotsonis M. Impact of a forward-facing step on the development of crossflow instability // *J. Fluid Mech.* 2021. Vol. 924, A34.

Работа поддержана фирмой Боинг, Гражданские самолёты (соглашение № 106 с ИТПМ СО РАН) и госзаказом Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121030500149-8)

УДК 532.526.3

ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ В ПРИСУТСТВИИ ДВУМЕРНЫХ СТУПЕНЕК ПОВЕРХНОСТИ И ТРЁХМЕРНОЙ ЗАВИХРЕННОСТИ ПОТОКА

Бородулин В.И., Иванов А.В., Качанов Ю.С.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Основной целью данного экспериментального исследования является изучение воздействия однородных по размаху элементов неровностей обтекаемой поверхности (таких, как комбинации выступов и уступов) на переход к турбулентности в пограничном слое 35-градусного скользящего крыла, инициируемый модами (вихрями и волнами) неустойчивости поперечного течения в присутствии нестационарных и стационарных вихрей набегающего потока. Измерения выполнены для прямоугольных (в плане) полосчатых неровностей различных высот (от 82 to 1103 микрон) шириной в 50 или 150 мм в направлении хорды. Измерения выполнены в широком диапазоне параметров в 76-ти различных режимах для двух различных типов существенно трёхмерных возмущений набегающего потока: (а) в основном нестационарных (сетка G1) and (б) смеси стационарных и нестационарных (сетка G9). Измерения выполнены термоанемометром в малотурбулентной аэродинамической трубе ИТПМ СО РАН при низких дозвуковых скоростях набегающего потока. Исследованный диапазон единичных чисел Рейнольдса Re_{1rb} в области начала неровности находится в диапазоне от $0,687 \cdot 10^6$ до $1,568 \cdot 10^6$ 1/м.

Хорошо известно, что снижение аэродинамического сопротивления является большим резервом улучшения аэродинамики современных самолетов и способно обеспечить улучшение их аэродинамического качества, включая значительное снижение расхода топлива. Поскольку пограничный слой на типичных транспортных самолетах в основном турбулентный, один из важных способов снижения лобового сопротивления может быть обеспечен применением различных средств управления ламинарным пограничным слоем, таких как использование ламинаризованных аэродинамических профилей, поскольку коэффициент ламинарного трения более чем на порядок ниже турбулентного.

Одна из важных трудностей проблемы ламинаризации пограничных слоев на реальных летательных аппаратах связана с возможным наличием различных дефектов обтекаемых поверхностей, которые способны привести к преждевременному переходу к турбулентности. Поэтому очень важно знать, каким образом и насколько сильно различные дефекты поверхности способны влиять на начало турбуликации потока.

Естественно, разделить все неоднородности аэродинамических поверхностей на две совершенно разные категории: (а) двумерные (2D) и (б) трёхмерные (3D). Воздействие их на устойчивость восприимчивость и переход к турбулентности пограничных слоёв также существенно различно. Оно также принципиально отличается в 2D и 3D пограничных слоях. В частности, в 2D пограничном слое, где доминируют волны неустойчивости Толлмина-Шлихтинга, даже

микроскопические неровности, как 2D, так и 3D, способны очень сильно влиять как на сценарий перехода, так и на положение начала турбуликации течения (см. [1], например).

В то же время, в 3D пограничном слое на скользящем крыле двумерные неровности (однородные по размаху) слабо влияют на переход к турбулентности, инициируемый существенно трёхмерными вихрями неустойчивости поперечного течения [2]. Однако, это влияние предположительно может возрасти в присутствии 3D вихрей свободного потока. Это предположение было проверено в данных экспериментах. Было обнаружено, что сценарии перехода для изученных режимов (с сеткой G1 или G9) существенно отличаются друг от друга (рис. 1 и 2). В то же время, оказалось, что в присутствии как стационарных, так и нестационарных вихрей потока, однородные по размаху выступы и уступы по-прежнему не оказывают существенного влияния, как на сценарии перехода, так и на положение начала турбуликации течения вплоть до очень больших высот неоднородностей, превышающих толщину вытеснения в 1,62 раза.

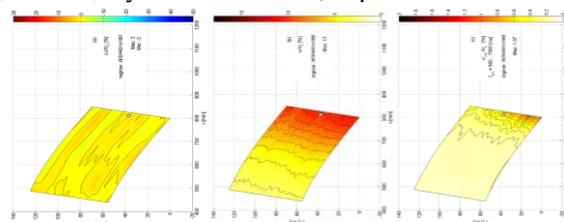


Рис. 1. Сценарий перехода, инициируемого нестационарными вихрями. Изолинии в плане амплитуд стационарных (а), нестационарных (б) и высокочастотных (с) возмущений. Сетка G1.

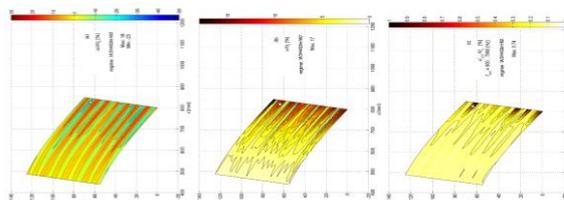


Рис. 2. Сценарий перехода, инициируемого смесью стационарных и нестационарных вихрей. Сетка G9.

Список литературы:

1. Crouch J.D., Kosorygin V.S. Surface-step effects on boundary-layer transition dominated by Tollmien–Schlichting instability // *AIAA J.* 2020. Vol. 58. No 7. pp. 2943–2950.
2. Rius-Vidales A.F., Kotsolis M. Impact of a forward-facing step on the development of crossflow instability // *J. Fluid Mech.* 2021. Vol. 924, A34.

Работа поддержана фирмой Боинг, Гражданские самолёты (соглашение № 106 с ИТПМ СО РАН) и Министерством науки и высшего образования РФ (проект № 121030500149-8)

УДК 532.517

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗВУКОВОЙ КРУГЛОЙ СТРУИ С ПОПЕРЕЧНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

Ванькова О.С., Яковенко С.Н.

Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Возрастающий интерес к управлению струйными течениями связан с их широким применением во многих отраслях промышленности. На горении газовых струй основаны различные технологии в энергетике. Например, при определенном воздействии на выхлопные струи летательных аппаратов снижаются уровень шума и вредное влияние на экологию. Струи также используются для точечного охлаждения нагретых поверхностей малоразмерных устройств. Для успешного решения таких задач необходимо понимать процессы, происходящие в струйных течениях, и развивать оптимальные способы управления этими процессами.

Проведенные физические эксперименты показывают, что активные методы управления потоком, в частности, акустическое и механическое воздействие, приводят к эффектам расщепления струи в широких диапазонах частот и амплитуд воздействия [1–5].

В настоящей работе выполнено численное моделирование истечения струи из круглого отверстия диаметром D со скоростью U при числе Рейнольдса $20 \leq Re (= UD/\nu) \leq 500$ в затопленное пространство (рис. 1, а). Проведены расчеты с поперечными акустическими и механическими возмущениями для изучения возможностей управления потоком в струе.

В качестве акустического воздействия на грани A (рис. 1, б) задан источник звука, с колебаниями давления $p' = a \sin(2\pi ft)$ различной амплитуды a , частотой f , с числом Струхала $0,01 \leq St (= fD/U) \leq 0,5$. Численные решения уравнений Навье–Стокса получены при помощи метода конечных объемов. Размеры расчетной области ($50D \times 20D \times 30D$) и число узлов в направлениях x - y - z выбраны с учетом результатов предыдущих исследований [5–7].

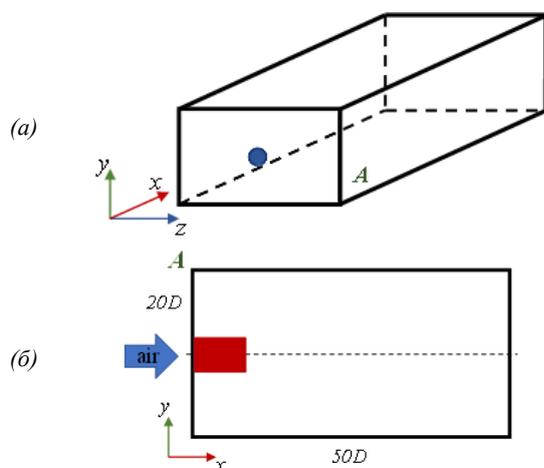


Рис. 1. Схема области расчета струи с возмущениями.

В качестве механического воздействия [5] заданы вибрации входного сечения (сопла струи) частотой f ($0,01 \leq St \leq 0,5$), амплитудой $0,01 \leq Z/D \leq 1$ и входного профиля скорости $u(z)$ амплитудой $0,01 \leq A/U \leq 1$.

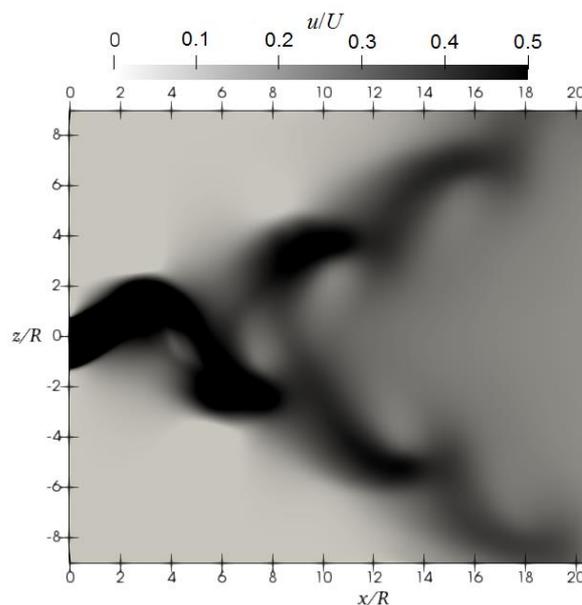


Рис. 2. Изолинии горизонтальной компоненты вектора скорости для вибраций сопла с амплитудой $Z = 0,5D$ при числах $Re = 250$ и $St = 0,1$ в момент времени $t = 180D/U$.

Результаты вычислений с поперечными гармоническими возмущениями демонстрируют расщепление струи в направлении воздействия (см., например, рис. 2). Рассматриваются вопросы активного управления потоком – влияния амплитуды и типа возмущений, чисел Re , St на картину течения и характеристики струи, осредненные по большим интервалам времени.

Список литературы:

1. Reynolds W., Parekh D., Juvet P., Lee M. Bifurcating and blooming jets // Annu. Rev. Fluid Mech. 2003. Vol. 35. P. 295-315.
2. Козлов В.В., Грек Г.Р., Литвиненко Ю.А., Козлов Г.В., Литвиненко М.В. Дозвуковые круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // Вест. НГУ. Серия: Физика. 2010. Т. 5, вып. 2. С. 28–42.
3. Фомин В.М., Анискин В.М., Маслов А.А., Миронов С.Г., Цырюльников И.С. Газодинамическая структура течения и развитие возмущений в микроструях // Докл. РАН. 2010. Т. 433, № 5. С. 635–638.
4. Кривокорытгов М.С., Голуб В.В., Моралев И.А. Развитие неустойчивостей в газовых микроструях при акустическом воздействии // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 18. С. 38-44.
5. Шевченко А.К., Яковенко С.Н. Численное исследование методов управления потоком и эффектов расщепления в круглой затопленной струе // Теплофиз. аэромех. 2021. Т. 28. С. 379-395.
6. Gohil T.V., Saha A.K., Muralidhar K. Control of flow in forced jets: a comparison of round and square cross-sections // J. Vis. 2010. Vol. 13. P. 141–149.
7. Tyliczszak A., Geurts B.J. Parametric analysis of excited round jets – Numerical study // Flow, Turbul. Combust. 2014. Vol.93. P.221-247.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00310, <https://rscf.ru/project/23-27-00310/>

УДК 536.244

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ НА ТЕПЛОБМЕН В СИНТЕТИЧЕСКИХ КРУГЛЫХ СТРУЯХ ВОЗДУХА ПРИ НИЗКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА.

Герасимов А.С., Леманов В.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Одним из распространенных типов ограниченных струйных течений является импактная синтетическая струя [1], т.е. нестационарная струя, натекающая на преграду нормально или под углом к ней. Специфика данной (синтетической) нестационарности заключается в том, что расход в источнике струи на отдельном интервале времени равен нулю, так называемая система “вдува-отсоса”. То есть отсутствует баллон со сжатым газом, а рабочим телом является окружающая среда. Такие струи находят применение при охлаждении в оптике [2] и микроэлектронике [3], для управления вектором тяги и снижения шума авиационных двигателей [4].

Известно, что в данной задаче имеется значительное количество влияющих параметров: число Рейнольдса (Re), расстояние до преграды (h), геометрия сопла, характеристики струйного источника (частота, амплитуда и т.д.) и др. В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования теплообмена в импактной синтетической круглой струе воздуха при низких числах Рейнольдса ($Re < 3800$). Рабочий участок включал генератор импульсов, акустический динамик, пластину с отверстием ($d=7$ мм), нагреваемый медный диск, электронагреватель и датчики теплового потока (ДТП). Отличительной особенностью данной работы было изучение пульсационных характеристик теплового потока, за счет применения ДТП с высоким пространственным и временным разрешением. Такие параметры необходимы для практики при нахождении максимальных (пиковых) значений теплового потока.

Целью данной работы является изучение влияния частоты колебаний струйного источника на теплообмен с нагретой поверхностью при вариации расстояния от начала струи до нагретой поверхности. Основным измеряемым параметром был тепловой поток на стенке медного диска. Данная характеристика измерялась с помощью тонкопленочного датчика размером $2 \times 2 \times 0,2$ мм. Автоматизированная система измерений позволяла получать мгновенное значение теплового потока с частотой до 3 кГц. В конечном итоге получали средние и пульсационные значения коэффициента теплоотдачи и числа Нуссельта на плоской поверхности. С помощью спектрального анализа также изучались частотные характеристики процесса теплообмена в импактной струе.

Одним из важных характеристик в данной задаче является изучение возможностей генерации синтетических струй с помощью стандартных устройств, например электроакустических динамиков. Такие данные представлены на рис.1. Здесь изображено изменение плотности теплового потока q в точке торможения пластины в зависимости от частоты струйного источника f при вариации расстояния до преграды h .

Как видно из рисунка наибольшее значение q наблюдается при низких частотах. Небольшой локальный экстремум в районе $f = 300-400$ Гц связан с наличием акустического резонанса в конструкции динамика. При частотах выше 500 Гц, синтетическая струя практически не генерируется. Известно, что на практике часто используются синтетические струи с частотами $f > 1000$ Гц с генераторами колебаний на основе пьезоэлементов.

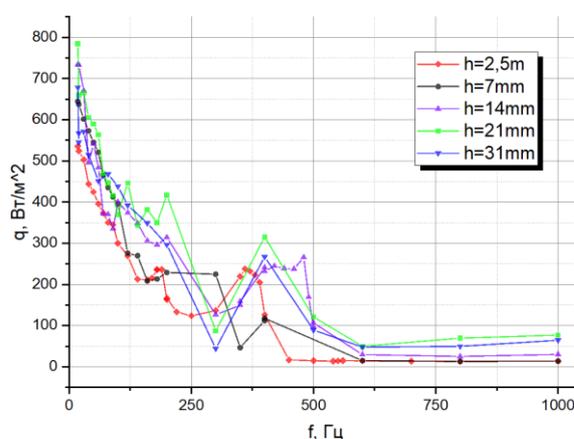


Рис. 1. Пульсации теплового потока в точке торможения плоской пластины.

Опытные данные, полученные в представленной работе, использовались в статье [5] для валидации расчета тепловых параметров в синтетической струе. Одним из важных результатов для практики является оценка экстремальных (пиковых) значений тепловых параметров.

Список литературы:

1. Glezer A., Amitay M. Synthetic jets // Fluid Mech. 2002. 34:503–29.
2. Deng X., Luo Z., Xia Z., Gong W., Wang L. Active-passive combined and closed-loop control for the thermal management of high-power LED based on a dual synthetic jet actuator // Energy Conversion and Management 132 – 2017, 207-212.
3. Campbell S.J. et al. Thermal management of a laptop computer with synthetic air microjets // ITHERM'98. Sixth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (Cat. No.98CH36208). 1998. P. 43–50.
4. Lahiri C. et al. The Application of an Aeroacoustic Actuator in a Zero Mass Flow Liner for Acoustic Damping // 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (32nd AIAA Aeroacoustics Conference). Portland, Oregon: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011.
5. Lemanov V.V., Pakhomov M.A., Terekhov V.I., Travnicek Z. Non-stationary flow and heat transfer in a synthetic confined jet impingement // International Journal of Thermal Sciences. 2022. Vol. 179. Art. 107607.

Работа выполнена частично при поддержке
РНФ (№ 23-29-00584)

УДК 536.24.083

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА НА РАЗВИТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ

Гетман П.В.^{1,2}, Щелчков А.В.^{1,2}, Попов И.А.¹, Зубков Н.Н.³

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111 г. Казань, ул. К. Маркса, 10

² Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Расходомерии – филиал Федерального Государственного Унитарного Предприятия «Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Метрологии им. Д.И. Менделеева», 420088, г. Казань, ул. 2-я Азинская, д. 7А

³ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Системы водяного охлаждения являются важными компонентами в многих промышленных и коммерческих приложениях. Одним из самых эффективных способов повышения коэффициента теплопередачи в системах водяного охлаждения является оребрение внутренней поверхности каналов. Несмотря на уже имеющиеся исследования интенсификации теплообмена на развитых поверхностях, еще недостаточно полно исследовано влияние геометрических параметров и вида поверхности, поэтому интерпретация и практическое использование экспериментальных данных часто вызывают затруднения.

Цель исследования: исследование процессов теплообмена при вынужденном течении теплоносителя в структурированных плоских каналах с шипами различной высоты и плотности; визуализация процесса вынужденного течения теплоносителя в структурированных плоских каналах; исследование процессов кипения на структурированных поверхностях. Для достижения этой цели выполнены следующие основные задачи:

1) Разработана и собран специальный экспериментальный стенд для исследования процессов теплообмена;

2) Разработана методика проведения эксперимента.

Экспериментальный стенд представляет собой изделие, состоящее из:

- технологической части;
- системы сбора и обработки информации.

Технологическая часть установки для исследования процессов теплообмена представлена на рисунке 1, где 1 – резервуар с водой, 2 – насос, 3 – демпфер, 4 – массомер, 5 – вентиль регулировки потока, 6 – датчик температуры, 7 – датчик давления, 8 – трансформатор, 9 – рабочий участок, 10 – радиатор.

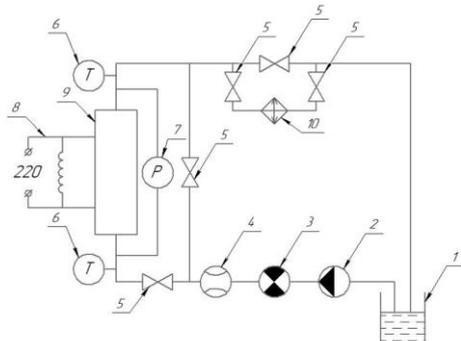


Рис. 1. Схема установки для исследования процессов теплообмена

Рабочий участок должен представлять собой корпус, выполненный из термостойкого материала, в который помещается металлическая пластина с шипами. В корпусе должен быть предусмотрен нагревательный элемент. Исследуемая пластина должна закрываться крышкой со штуцерами для входа и выхода теплоносителя. Между корпусом и крышкой должны быть предусмотрены стенки из термостойкого материала. Таким образом металлическая пластина, стенка и крышка образуют собой плоский канал.

Методика проведения эксперимента и измерений должна определять основные требования к средствам измерений, методике и условиям выполнения измерений, а также оценке неопределённости измерений. Установка обеспечивает измерения массового расхода, температуры и давления, жидкости.

В рамках методики измерений рассчитываются теплообменные параметры, такие как:

– Количество теплоты:

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta t$$

где G – массовый расход теплоносителя, кг/с;

c – удельная теплоемкость теплоносителя;

Δt – разница между температурами теплоносителя на входе в рабочий участок и на выходе из него.

– Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Q}{F_{m.o.} \cdot \Delta t_{wf}}$$

где $F_{m.o.}$ – площадь теплообменной поверхности, м²;

Δt_{wf} – разница температур между теплоносителем и теплообменной поверхностью.

Для сравнения теплофизических характеристик пластин с различными геометрическими параметрами шипов использовалось уравнение подобия Нуссельта при вынужденном движении потока в прямых трубах или каналах для ламинарного режима движения теплоносителя $Re \leq 2320$:

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot (Pr_f/Pr_w)^{0,25}$$

где Re – число Рейнольдса;

Pr_f, Pr_w – число Прандтля для стенки и теплоносителя соответственно;

Gr – число Грасгофа.

На основании расчетных и экспериментальных данных можно сделать вывод о влиянии геометрических параметров развитых структур на коэффициент теплоотдачи. Полученные результаты можно соотнести с другими экспериментальными данными

УДК 533.69; 533.6.001.32

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЧЕЧНОГО ОТСОСА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПОЛОЖЕНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА НА ВОЛНИСТОМ КРЫЛЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА

Зверков И.Д.^{1,2}, Крюков А.В.^{1,2}, Чехов В.П.¹

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

² Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Работа посвящена экспериментальному исследованию ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) на верхней поверхности высоконесущего ламинаризованного профиля при числах Рейнольдса 270 000. В работе рассмотрены особенности применения тепловизионного метода исследования ЛТП на моделях крыла с гладкой и волнистой поверхностью с ламинаризованным профилем GU-25-5(11)8 modified, а также результаты применения локального отсоса пограничного слоя для уменьшения профильного сопротивления крыла.

Известно, что при числах Рейнольдса меньше 10^6 на поверхности крыла имеется переходная область между участками с ламинарным и турбулентным течением, именуемая отрывным пузырьком (1). Отрывной пузырьком в общем случае негативно влияет на обтекание крыла поскольку увеличивает лобовое сопротивление, является источником крупномасштабных пульсаций способствующих турбулизации потока, а также является основной причиной возникновения гистерезиса аэродинамических характеристик. В ранних работах (1-4) показано при числах Рейнольдса порядка 150 000 дробление сплошной отрывной области на локальные отрывные зоны, при помощи волнистой поверхности, устраняет негативное влияние отрывного пузырька на обтекание крыла. В экспериментальных работах (2,3) использовался профиль максимальной толщины которого находилась на 15 и 25 % от передней кромки для верхней и нижней поверхностей. Предыдущие исследования волнистого крыла позволили определить параметры локализации и оптимизации волнистости.

На практике оказалось, что применение крыльев большого удлинения с ламинаризованными профилями, имеющими высокое аэродинамическое качество для малоразмерных летательных аппаратов невозможно из-за резкого снижения характеристик профилей при снижении числа Рейнольдса меньше 400000. С учётом результатов предыдущих работ была разработана волнистая поверхность для ламинаризованного профиля GU-25-5(11)8 modified. (см. рис.1).

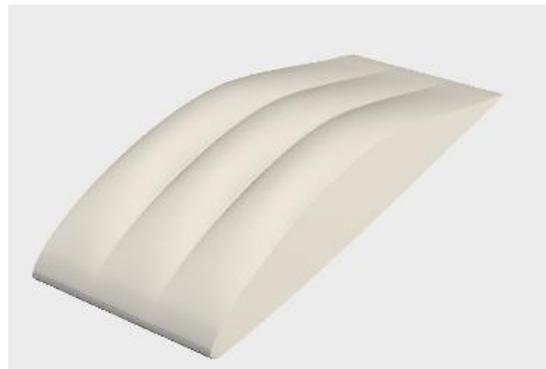


Рис.1. Волнистое крыло с ламинаризованным профилем

В ходе эксперимента на Т-324 были получены тепловизионные изображения распределение температуры на подветренной поверхности гладкого и волнистого крыла. Тепловизионная визуализация показала разницу в положении ЛТП по линии горба и по линии впадины в 15% по хорде крыла. Вдоль линии горба ЛТП происходит позже. Показано, что точечный отсос на волнистом крыле, расположенный по линии впадины способен продлить ламинарный участок течения как по линии впадины так и по линии горба. Измерение потери импульса в следе крыла показало, что волнистая поверхность крыла даёт возможность реализовать технологию точечного отсоса пограничного слоя, что приводит к уменьшению профильного сопротивления крыла.

Список литературы:

1. Zverkov I.D., Zanin B.U., Kozlov V.V. Disturbances Growth in Boundary layers on classical and wavy surface wing // AIAA Journal. 2008. Vol. 46., No. 12. P. 3149–3158.
2. Зверков И.Д., Козлов В.В., Крюков А.В. Особенности обтекания прямого и скользящего крыла конечного размаха с гладкой и волнистой поверхностью в области критических углов атаки // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2012. Т.4, вып. 2. С. 26-42.
3. Зверков И.Д., Крюков А.В. Воздействие на пограничный слой крыла малоразмерного летательного аппарата с помощью волнистой поверхности. // ПМТФ. 2021. Т. 62. № 3. С.180-198.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ госрегистрации 121030500149-8)

УДК 536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ПРИ ОБТЕКАНИИ СОТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В КАНАЛЕ

Золотухин А.В., Терехов В.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящее время в аэродинамике важную роль играет поиск и внедрение эффективных способов управления потоком с целью увеличения эффективности обтекания различных объектов, улучшения влияния на теплообменные процессы между объектом и средой и т.д. Одним из таких способов является применение сотовых поверхностей с ячейками гексагональной формы. В работах [1-3] представлены результаты экспериментального исследования влияния сотовых ячеек на протекающий в канале поток газа. Одним из результатов их взаимодействия является эффект «проскальзывания» потока. По данным из работ [1, 2] обнаруженный эффект характерен снижением трения по причине формирования в отдельных ячейках периодических вихрей, которые способствуют уменьшению взаимодействия между потоком среды и сотовой поверхностью. Снижение трения и общее снижение взаимодействия между поверхностью и средой является на данный момент одной из наиболее актуальных задач в большом спектре энергетических технологий.

Данная работа является продолжением [4] и посвящена дополнению опытных данных по развитию поля течения и турбулентных характеристик вдоль и внутри сотовых ячеек гексагональной формы с поперечным размером d равным 12 мм, глубиной b равной 2.4, 6, 12 и 24 мм и толщиной стенок между ячейками 0.5 мм. Рабочий канал экспериментального стенда имел прямоугольное сечение размером 20×150 мм, длину 1 м и был выполнен из прозрачного органического стекла толщиной 8 мм. На расстоянии 580 мм от входа в канал заподлицо монтировались сотовые пластины размером 58×182 мм. Измерения проводились с помощью двух оптических методов: PIV-системы, состоящей из твердотельного импульсного Nd:YAG лазера с длительностью вспышки 5 нс и цифровой камеры с матрицей 1 Мпикс, и метода LDA, состоящего из блока излучателя ЛАД-06С и координатно-позиционирующего устройства. Сравнение результатов описанных методов представлены на графике (рис. 1а). В опытах проводилось исследование развития течения по всей длине сотовых поверхностей в нескольких сечениях при постоянных числах Рейнольдса: $Re = Uh/\nu = 7 \cdot 10^3 - 4.6 \cdot 10^4$, где h – высота канала, U – среднерасходная скорость в канале. Однако LDA, являясь точечным оптическим методом, позволял измерять динамические параметры потока внутри отдельных ячеек каждого из представленных сотовых участков, что способствовало изучению интенсивности и размеров вихревых структур в гексагональных ячейках. Пример профилей скорости в центре ячеек различной глубины представлен на рисунке 1б. На графике наглядно показано, как изменение глубины гексагональной соты влияет на интенсивность вихревой структуры в центральной части исследуемых ячеек.

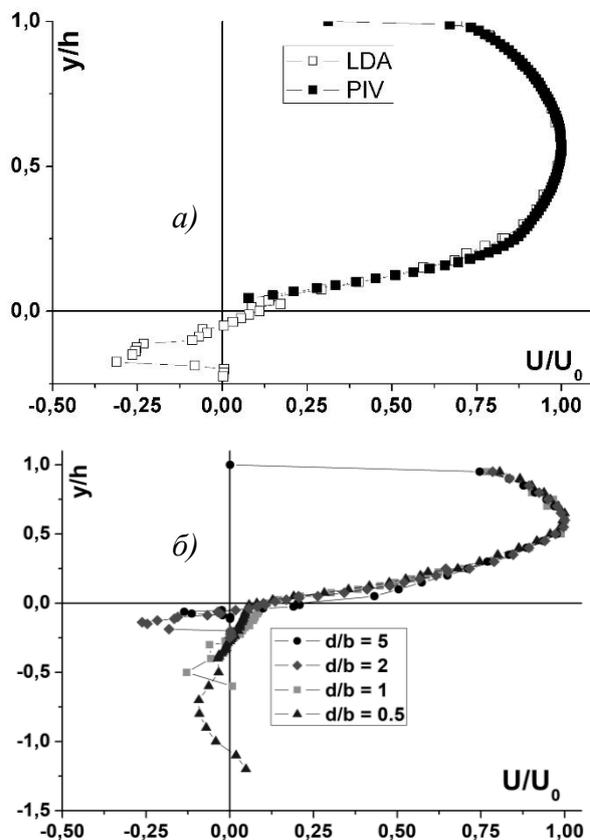


Рис. 1. а) Сравнение профилей безразмерной продольной скорости потока вдоль сотовой поверхности с глубиной ячейки b равной 6 мм, полученных с помощью методов LDA и PIV; б) распределение скорости в канале с различной глубиной сотовых ячеек.

Список литературы:

1. Trdatyan S.A., Klimov A.A. Friction and heat transfer on a honeycomb surface in laminar and turbulent flows // Proc. of the 12th Intern. Heat Transfer Conf. (2002, Grenoble, France). Grenoble, 2002. Vol. 2. P. 609–614.
2. Климов, А.А., Трдатян С.А. Использование сотовой поверхности для управления пограничным слоем // Теплофизика Высокотемператур. – 2003. Т. 41 (6). С. 901–906.
3. Butt U., Jehring L., Egbers C. Mechanism of drag reduction for circular cylinders with patterned surface // Int. J. of Heat and Fluid Flow. – Vol. 45 (1). P. 128–134. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.10.008.
4. Терехов В.И., Смольский Я.И., Шаров К.А., Золотухин А.В. Структура пограничного слоя при обтекании сотовой поверхности в плоском канале // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21 (6). С. 719–724.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации
(мегагрант № 075-15-2021-575)

УДК 621.9

ЭФФЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА: ОТ ЛУНОК К НАКЛОННЫМ КАНАВКАМ

Исаев С.А.^{1,2}, Никущенко Д.В.¹, Судаков А.Г.², Лебига В.А.³

¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3

² Санкт-Петербургский государственный университет им. Главного маршала авиации А.А. Новикова,
196210, Россия, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38

³ Институт теоретической и прикладной механики им. А.С. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Известно открытие Дрейцером Г.А. и его коллективом в МАИ [1] эффективных поверхностей теплообмена в трубах и каналах, структурированных упорядоченными выступами (например, на основе вальцовки труб). Тепловая эффективность таких поверхностей может быть в десять раз выше, чем гладких стенок. Однако гидравлические потери при этом растут 30-кратно. Поэтому такой способ интенсификации хорош при больших ресурсах полного давления.

Почти сорок лет развивается альтернативный подход к вихревой интенсификации теплообмена, связанный с нанесением на стенки упорядоченных лунок, как правило, сферических. Для него характерно умеренное увеличение гидравлических потерь при ограниченном росте тепловой эффективности (порядка двух раз). Гидродинамический механизм интенсификации теплообмена обуславливается, как установлено Кикнадзе Г.И., самоорганизацией закрученных струйно-вихревых структур в сферических и конических лунках. Они идентифицированы в многочисленных исследованиях (см., например, [2, 3]). Однако скорости вторичного и возвратного течения в лунках оказываются незначительными и внутри них образуются зоны угнетенного теплообмена.

Стремление интенсифицировать отрывное течение и теплообмен в лунках давно вызвало интерес к созданию асимметричных закрученных потоков высокой интенсивности. Сферические формы лунок изменялись на эллиптические, а затем овальные, в которых две половинки сферической лунки соединялись цилиндрической траншеей. Наклон лунок к набегающему потоку и их длина оказались важными параметрами, определяющими интенсификацию течения и теплообмена.

Сравнительно недавно открыто явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена (АИОТТ) в наклонных овально-траншейных лунках - канавках на стенках узких каналов и пластинах [4, 5]. Ультравысокие скорости возвратного и вторичного, закрученного потоков в отрывных зонах канавок оказываются порядка и выше характерных скоростей, а абсолютные величины отрицательного трения и тепловых потоков на дне канавки в однорядном плоском пакете многократно (до 6-8 раз) превосходят соответствующие характеристики на стенках плоскопараллельных каналов. Гидродинамические механизмы АИОТТ обуславливаются экстраординарными перепадами давления в канавках между зонами торможения на наветренном склоне и разрежения в месте ге-

нерации торнадоподобного вихря. Эти перепады сопоставимы с перепадами давления между критическими точками при обтекании кругового цилиндра или шара.

Экспериментальное подтверждение экстраординарных перепадов давления в канавке на пластине и стенке канала, которые хорошо согласуются с расчетными прогнозами, получено в экспериментах НИИ механики МГУ [6]. Численно установленное ускорение потока в узком канале с однорядными наклонными канавками обнаружено экспериментально на стенде КазНЦ РАН [4, 5]. А двукратное усиление отнесенной теплоотдачи на дне канавки под углом наклона 45° на пластине по сравнению с гладкой пластиной при $Re=3 \times 10^4$ хорошо согласуется с численными результатами.

Предложены новые формы траншейно-конических лунок и зигзагообразные пакеты нанесения канавок [7, 8].

Список литературы:

1. Kalinin E.K., Dreitsler G.A., Kopp I.Z., Myakotchin A.S. Efficient surfaces for heat exchangers: fundamental and design. Begell house. 2002. 414p.
2. Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., Hassel E. Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on the turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel // Int. J. Heat Mass Transfer. 2010. Vol.53. Issues 1-3. P.178-197.
3. Isaev S.A., Schelchikov A.V., Leontiev A.I., Baranov P.A., Gulcova M.E. Numerical simulation of the turbulent air flow in the narrow channel with a heated wall and a spherical dimple placed on it for vortex heat transfer enhancement depending on the dimple depth // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2016. Vol.94. P.426-448.
4. Исаев С.А. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях // МЖГ. 2022. №5. С. 13-24.
5. Исаев С.А. Аэрогидродинамические механизмы интенсификации физико-энергетических процессов на структурированных энергоэффективных поверхностях с вихревыми генераторами // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т.30. №1. С.83–88.
6. Зубин М.А., Зубков А.Ф. Структура отрывного обтекания цилиндрической каверны на стенке плоского канала // МЖГ. 2022. №1. С. 81–89.
7. Isaev S., Leontiev A., Gritskevich M., Nikushchenko D., Guvernyuk S., Sudakov A., Chung K.-M., Tryaskin N., Zubin M., Sinyavin A. Development of energy efficient structured plates with zigzag arrangement of multirow inclined oval trench dimples // Int. J. Thermal Sciences. 2023. Vol.184. 107988.
8. Исаев С.А., Никущенко Д.В., Попов И.А., Судаков А.Г., Трякин Н.В., Юнаков Л.П. Интенсификация теплообмена в облупленном узком канале при трансформации отрывного турбулентного течения с ростом угла уклона уединенной конической лунки // ТВТ. 2022. Т.60. №2. С. 235-241.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ (гранты №№ 22-19-00056 (эксперимент) и 23-19-00083 (расчеты)) и частичной поддержке РФФИ (грант № 21-58-52013)

УДК 532.36

СОВМЕЩЕНИЕ PIV И ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕЧЕНИЯ В ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКЕ

Исаев С.А.¹, Сероштанов В.В.^{1,2}, Митяков В.Ю.^{1,2}, Сапожников С.З.²

¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Многие способы интенсификации теплообмена предусматривают создание крупных высокотурбулентных отрывных и вихревых зон, разрушающих пограничный слой, что способствует перемешиванию среды. До недавнего времени наиболее изученными и применяемыми были лунки, эффективность которых определяется способностью генерировать интенсивные вихри. Вихребразование в лунке зависит от ее формы. Перспективной является овално-траншейная лунка (ОТЛ), наклоненная под углом φ к набегающему потоку [1]. В работе измерена местная плотность теплового потока в различных сечениях ОТЛ методом градиентной теплотметрии в зависимости от скорости набегающего потока, а также исследовано течение внутри ОТЛ с помощью PIV [2].

Эксперимент выполнен в дозвуковой аэродинамической трубе Научно-образовательного центра «Теплофизика в энергетике» СПбПУ. Труба оснащена водо-воздушным теплообменником, что позволяет поддерживать температуру набегающего потока практически постоянной.

Модель послужила ОТЛ со следующими размерами: диаметр лунки $D = 40$ мм, относительная глубины $h/D = 0,25$, относительное удлинение цилиндрической части $L/D = 5$. Модель лунки выполнена из медного листа толщиной 0,4 мм и впаяна в торец цилиндрического короба диаметром 300 мм, выполненного из стального листа толщиной 0,1 мм. Короб с лункой, обогреваемый насыщенным водяным паром, размещается заподлицо с прямоугольной пластиной размерами 600×700 мм. Пластина также обогревается насыщенным водяным паром при атмосферном давлении. Таким образом, температура поверхности поддерживалась постоянной и близкой к 100 °С.

На поверхности ОТЛ в различных точках устанавливались 3 градиентных датчика теплового потока (ГДТП) из монокристаллического висмута размерами 2,5×2,5×0,2 мм и вольт-ваттной чувствительностью $S_0 = 10$ мВ/Вт [2]. Рассмотрены два характерных сечения ОТЛ (рис. 1): переходное – сечение, где цилиндрическая часть переходит в сферическую (координата t), и продольное среднее сечение ОТЛ (координата s).

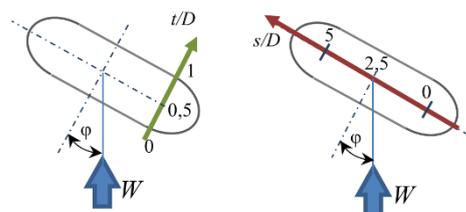


Рис. 1. Исследуемые сечения ОТЛ.

В отдельной серии опытов выполнялись PIV-измерения поля скорости внутри ОТЛ при скоростях потока от 0,4 м/с до 12 м/с ($Re = (1...3) \cdot 10^4$). В качестве характерного размера выбран диаметр D .

На рис. 2 представлены зависимости относительного коэффициента теплоотдачи (КТО) для переходного и продольного сечений, соответственно. КТО отнесен к значению КТО на пластине в смежной точке.

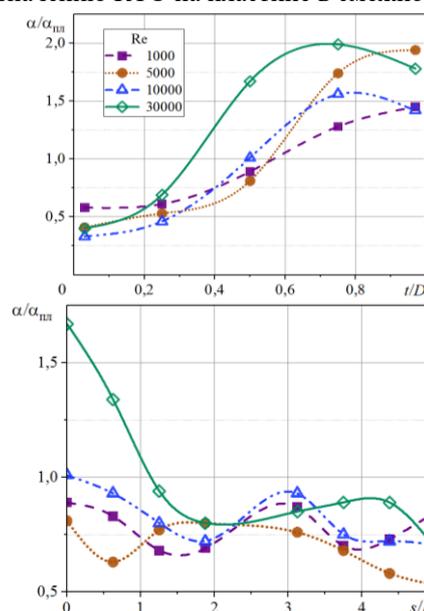


Рис. 2. Распределение ОКТО в переходном (а) и среднем (б) сечениях.

Сложное пространственное течение в наклонной ОТЛ и образование торнадоподобного вихря вблизи от зоны торможения [1] обеспечивает увеличение КТО внутри ОТЛ до 1,5...2 раз в области переходного сечения, расположенном выше по потоку.

Результаты исследований создают основу для изучения течения и теплообмена в ОТЛ при различных углах натекания и облуненных поверхностях с помощью численного моделирования.

Список литературы:

- Исаев С.А. Генезис аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на структурированных поверхностях / С. А. Исаев // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2022. № 5. С. 13-24.
- Gradient Heatmetry Advances / Sapozhnikov, S.Z.; Mityakov, V.Y.; Mityakov, A.V.; Gusakov, A.A.; Zainullina, E.R.; Grekov, M.A.; Seroshstanov, V.V.; Bashkatov, A.; Babich, A.Y.; Pavlov, A.V. Energies 2020, 13, 6194.

Работа поддержана грантом РНФ 22-29-00056

УДК 533.697.4

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОПЛА ВНЕШНЕГО РАСШИРЕНИЯ С УЧЕТОМ ТУРБУЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ

Каун Ю.В., Чернышов М.В.

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская улица, дом 1

В работе обосновывается использование сопла внешнего расширения с профилированным центральным телом в клиновоздушном ракетном двигателе, работающем в широком диапазоне высот полёта. Рассматривается обтекание гладкого профилированного центрального тела, выполненного в виде усеченного конуса, и центрального тела с перфорированной вставкой, предположительно улучшающей тяговые характеристики.

Использование сопел внешнего расширения («штыревых сопел» [1]) в широкодиапазонных реактивных двигателях (ШРД) представляется оптимальным как для сверхлегких ракет-носителей, выводящих малые космические аппараты на низкие околоземные орбиты [2], так и для ракетной техники, выполняющих задачи в широком диапазоне высот.

Помимо перехода к новым схемам сопловых блоков, улучшение аэродинамических и тяговых характеристик может быть достигнуто путём использования перфорированных структур. Использование газопроницаемых покрытий со сложной внутренней структурой может привести к увеличению силы тяги классического сопла Лавалю благодаря использованию перфорированных покрытий, по данным работы [3], не превышает 2-4%. Однако предварительные результаты расчёта течения воздуха по соплу внешнего расширения с частично перфорированным центральным телом свидетельствуют об увеличении силы тяги такого сопла на 8-11% [3]. Для верификации результатов работы [3] и придания им практической ценности необходимо более полное воспроизведение условий работы соплового блока ШРД, включающее расчет течения реально образующихся продуктов сгорания.

В данной работе рассчитывалось струйное истечение продуктов сгорания во внешний спутный поток воздуха с начальным числом Маха $M=2$ и термодинамическими характеристиками, соответствующими условиям стандартной атмосферы на заданных высотах полёта (0, 10 и 20 км). В частности, давление спутного потока воздуха задавалось равным 1.0, 0.265 и 0.055 атм, соответственно.

Геометрические параметры сопла внешнего расширения подбирались так, чтобы секундный массовый расход продуктов сгорания (8.47 кг/с) соответствовал соплу Лавалю двигателя-аналога. Относительно небольшие размеры сопла внешнего расширения в данном случае определяются его предполагаемым основным назначением – двигательная установка носителя сверхлегкого класса для вывода на околоземную орбиту полезной нагрузки до 10 кг [4].

Расчет тяговых характеристик сопловой части двигательной установки подразумевает учет параметров набегающего внешнего потока при движении лета-

тельного аппарата в атмосфере со сверхзвуковой скоростью. Как известно, при взаимодействии сверхзвуковой струи с внешним спутным потоком ударно-волновая структура течения существенно усложняется [5, 6]. В частности, в спутном потоке образуется отошедший «висячий» скачок уплотнения, а на внешней поверхности корпуса летательного аппарата может возникнуть обширная зона отрыва пограничного слоя.

Использование газопроницаемого покрытия приводит к заметному увеличению зоны с пониженным давлением на хвостовую часть центрального тела. Согласно полученным расчётным данным, такое увеличение зоны разрежения, способствуя возникновению такого эффекта, как аэродинамический клин, противодействие при этом оказывается больше, чем возникающее при этом дополнительное аэродинамическое сопротивление. Тем самым создаётся дополнительная сила тяги сверхзвуковой части штыревого сопла.

При большом давлении (1 атм) набегающего спутного потока обтекаемое перфорированное покрытие играет роль естественного турбулизатора течения, что является причиной отрыва потока от центрального тела с образованием обширной застойной области. Высокое противодействие на хвостовую часть центрального тела приводит к увеличению силы тяги (согласно результатам расчета – на 8,8%).

Использование перфорированных вставок на поверхности центрального тела дополнительно увеличивает тягу на 8-11% благодаря перестройке ударно-волновой структуры течения и перераспределению сил давления по поверхности центрального тела.

Список литературы:

1. Каторгин Б.И., Стернин Л.Е., Старков В.К. и др. Исследование характеристик многокамерного ракетного двигателя с общим плоским штыревым соплом на топливах кислород-водород и кислород-керосин. Технический отчет № 769-79-97 НПО Энергомаш, 1997. 181 с.
2. Лукашевич В.П., Афанасьев И.Б. Космические крылья // М.: ЛенТа Странствий. 2009. 498 с.
3. Зайковский В.Н., Киселев В.П., Киселев С.П., Меламед Б.М., Соколовский М.И., Тодощенко А.И., Трубочеев Г.В., Фомин В.М. О влиянии пористой вставки в сверхзвуковой части сопла на изменение его тяги // Доклады РАН. 2005. Т. 401. № 4. С. 479-482
4. Ito T., Fuji K. Numerical analysis of the base bled effect on the aero-spike nozzles // 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 2002. AIAA Paper 2002-0512. 10 p.
5. Авдудевский В.С., Ашратов Э.А., Иванов А.В., Пирумов У.Г. Газодинамика сверхзвуковых неизобарических струй. М.: Машиностроение, 1989. 320 с.
6. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука, 1984. 236 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FZWF-2020-0015

УДК 532.526

К ВОПРОСУ УСТОЙЧИВОСТИ СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СО СЛАБЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Кириловский С.В., Поплавская Т.В., Сидоренко А.А.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4

Известно, что характеристики летательного аппарата (ЛА) в значительной степени зависят от положения области ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) и ее длины. Правильный прогноз положения ЛТП очень важен для задач проектирования перспективных ЛА. При определении положения ЛТП в пограничном слое (ПС), необходимо учитывать различные специфические особенности потока, которые ухудшают характеристики отдельных элементов и ЛА в целом. Одним из аспектов проблемы обеспечения ламинарного обтекания ЛА и лопаток турбомашин является необходимость предсказания влияния на ЛТП слабых градиентов давления, вызванных ударными волнами (УВ). Несмотря на небольшую величину градиента давления, такие УВ значительно меняют параметры в ПС и могут вызывать локальные отрывы. В силу этого, традиционные методы предсказания положения перехода, основанные на расчете невязкого обтекания тела, решении уравнений ПС и последующем анализе его устойчивости не позволяют предсказывать переход в подобных течениях. Методы, основанные на расчете течения RANS с использованием переходных моделей турбулентности, недостаточно верифицированы для подобных течений. В этом случае перспективным представляется подход, комбинирующий достоинства RANS с физически обоснованным способом предсказания перехода, основанном на методе eN [1]. Поскольку данный подход позволяет рассчитывать коэффициенты роста возмущений как в безотрывном, так и в отрывном течении, представляется возможным выполнить параметрическое исследование влияния УВ на переход в достаточно широком диапазоне интенсивности ударной волны.

Целью данной работы является исследование устойчивости сверхзвукового ПС на пластине ($M_\infty=2$) при его взаимодействии со слабыми ударными волнами (УВ). Эта задача решается численно с использованием метода интеграции программного комплекса LOTRAN 3.0, созданного в ИТПМ СО РАН, и газодинамического пакета ANSYS Fluent. В рамках этой вычислительной технологии решаются две задачи: 1) расчет ламинарного обтекания модели с помощью программного комплекса ANSYS Fluent (получение характеристик основного течения), и 2) анализ устойчивости профилей основного течения с использованием программного комплекса LOTRAN 3.0.

Расчетная область (в плоскости xu) для задачи обтекания пластины показана на Рис.1, где приведено поле статического давления: нижняя поверхность (1) совпадает с пластиной, верхняя поверхность имеет выступ (2), предназначенный для слива УВ, идущей с передней кромки пластины, и клин (3) с углом наклона θ , генерирующий падающую (4) на ПС пластины УВ.

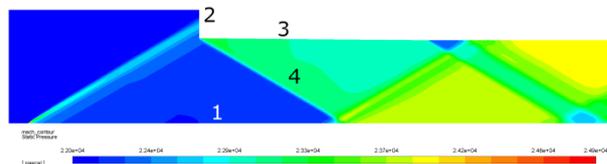


Рис. 1.

Далее рассчитанные данные основного течения, включающие данные отрывного течения, передаются в модуль LOTRAN 3.0. В процессе работы блок Изменение угла наклона приводит к изменению интенсивности падающего скачка уплотнения. Т.о. при увеличении угла наклона клина в месте взаимодействия УВ и ПС пластины может возникнуть локальная зона отрывного течения.

LOTRAN 3.0 определяет характеристики ПС (толщины вытеснения и потери импульса и т.п.) для качественной оценки результата усвоения данных, полученных из ANSYS Fluent, проводит анализ устойчивости течения, рисует точки начала и конца областей временной неустойчивости, кривые N -факторов и их огибающую (например, Рис.2). На Рис.2 представлены эти характеристики для волн Толлмина – Шлихтинга (TS). Видно, что в области взаимодействия ПС с падающей УВ ($x \approx 0.17m$) наблюдается заметное увеличение значений N -факторов.

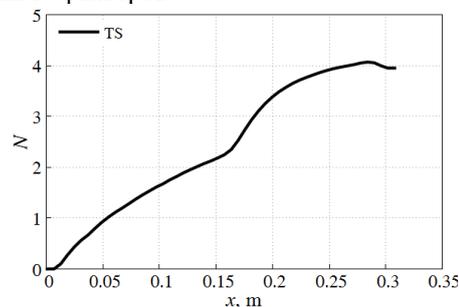


Рис. 2.

Т.о. предложенный подход с помощью вычислительной технологии объединения ANSYS Fluent и LOTRAN 3.0 позволяет рассчитывать устойчивость течений с ударными волнами, в том числе при наличии локальных отрывных зон.

Список литературы:

1. Boiko A.V., Demyanko K.V. and Nechepurenko Y.M. On computing the location of laminar-turbulent transition in compressible boundary layers // Rus. J. Num. Anal. Math. Mod., 2017, Vol. 32, No. 1, P. 1–12.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН

УДК 533.6.011.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЗА ВЕТРОТУРБИНАМИ УЛЬЯНОВСКОГО ВЕТРОПАРКА

Ковальногов В.Н., Хахалева Л.В., Корнилова М.И., Хахалев Ю.А., Федоров Р.В., Демидов Д.А.

Лаборатория междисциплинарных проблем энергетики
Ульяновского государственного технического университета,
432027, Россия, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

Математическое моделирование ветропарков представляет собой сложную задачу, особенно при учете всех влияющих факторов и многомасштабности [1]. Сегодня моделированию взаимодействия ветротурбин уделяется достаточное внимание в научной литературе. Это связано с актуальностью данной тематики, так как именно ветроэнергетика стала наиболее динамично развивающейся отраслью энергетики во всем мире [2].

Авторами предпринято моделирование течения за группой из 7 ветротурбин Ульяновского ветропарка. Процесс моделирования включает несколько этапов: построение геометрической модели части ветропарка, наложение расчетной сетки, задание граничных и начальных условий, выбор модели турбулентности, расчет и постпроцессорная обработка результатов. В качестве инструмента был выбран коммерческий CFD пакет Star CCM+ Academic Pac.

Геометрическая модель ветротурбины была построена в масштабе 1:100. Далее ветротурбины размещались по площади ветропарка в соответствии с картой. Общая площадь участка составила $4 \times 4 \text{ км}^2$.

Предварительно были протестированы два вида сеток: триммерная и полигедральная. Полигедральная с точки зрения точности расчета-затраты времени получилась более предпочтительной. Для большей точности расчета на обтекаемых поверхностях ветротурбин и подстилающей поверхности применялись призматические слои, так как полигедральная сетка не является регулярной. За базовый размер сетки принимался шаг 5 м. А далее уже размер регулировался процентным соотношением. Сетка сгущалась в пристеночных областях, также в расчетном туннеле за ветротурбинами. Шаг по времени составил 0,01 с.

Граничные и начальные условия задавались следующим образом: вертикальный профиль ветра

$$u = u_1 \left(\frac{h}{h_1} \right)^n$$

и профиль температуры

$$T = A + B \cdot h$$

принимались исходя из метеорологических данных [3]. Так как высота расчетной области незначительная (300 м), то поле давления принималось однородным. На подстилающей поверхности была задана шероховатость $z_0 = 0,003 \text{ м}$ в соответствии с [4]. Для обеспечения необходимой точности расчета использовалась пристеночная функция y^+ вблизи поверхностей.

В качестве расчетной была выбрана модель турбулентности k- ω SST Ментера.

Эволюция турбулентности представлена на рисунках (см. рис. 1 и рис. 2).

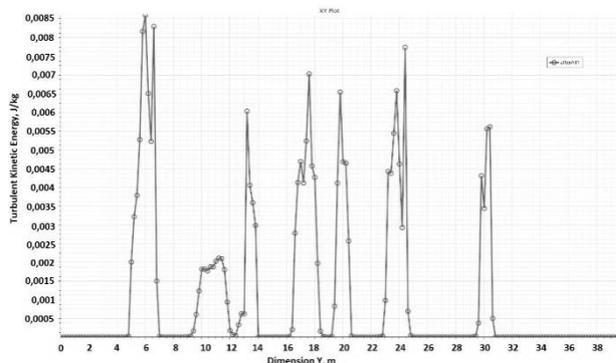


Рис. 1. Уровень кинетической энергии турбулентности в поперечном сечении ветропарка сразу после всех турбин.

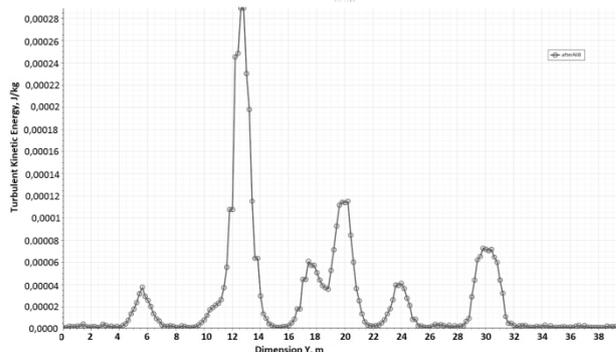


Рис. 2. Уровень кинетической энергии турбулентности в поперечном сечении ветропарка после всех турбин в конце расчетного туннеля.

На расстоянии 1,1 км турбулентность снижается от 30 до 50 раз. Данный расчет дал несколько завышенные результаты по сравнению с k- ϵ моделью и экспериментальными данными. Авторы работы [1] отмечают наличие следа на удалении 2 км. Результаты расчета показали более быстрое затухание следа и восстановление профиля скорости. По кинетической энергии турбулентности восстановление происходит еще быстрее.

Список литературы:

1. Наумов И.В., Миккельсен Р.Ф., Окулов В.Л. Оценка дальности распространения следа и уровня его пульсаций за роторами ветрогенераторов Теплоэнергетика, 2016. № 3, с. 54–60.
2. Bastanhaha M., Porte-Agel F. Power optimization of wind farms using yaw angle control: a wind tunnel study. J. Renewable sustainable energy. 2019. 11, 023301.
3. www.globalwindatlas.info.api.vortexfdc.com
4. Малявая Г.В. Влияние параметров шероховатости подстилающей поверхности на скорость ветра // Buletinul AŞM. Ştiinţele vieţii. 2014. №. 2(323), с. 181-187.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда <https://rscf.ru/project/22-19-00030/>

УДК 532.526

К ВЛИЯНИЮ РАДИУСА ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ ПЛАСТИНЫ НА ВОСПРИИМЧИВОСТЬ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ СТАЦИОНАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Косинов А.Д., Питеримова М.В.

Институт теоретической и прикладной механики им С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Известно, что при боковом воздействии слабых ударных волн на переднюю кромку плоской пластины в сверхзвуковом пограничном слое порождается стационарный след. Его пространственные характеристики в трансверсальном направлении зависят от величины притупления передней кромки пластины [1]. Сформировавшееся неоднородное течение оказывает влияние на процесс ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковом пограничном слое [2]. При моделировании этого процесса актуальными являются два метода: прямое численное моделирование и проведение расчетов с использованием волнового подхода теории гидродинамической устойчивости, а успешность работы зависит от наличия экспериментальных данных для сравнения с численными результатами.

В докладе рассматриваются оценки волновых характеристик воздействующих на переднюю кромку стационарных возмущений и инициируемого ими следа, а также их относительных значений, характеризующих восприимчивость пограничного слоя плоской пластины при числе Маха 2.

Эксперименты проведены в сверхзвуковой малозвучной аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН. Они подробно описаны в [1]. Исходные данные для проведения оценок волновых спектров амплитуды по трансверсальной компоненте волнового числа β взяты из [1]. На рис. 1 приведен пример исходных данных: Распределение нормированной величины массового расхода по трансверсальной координате z .

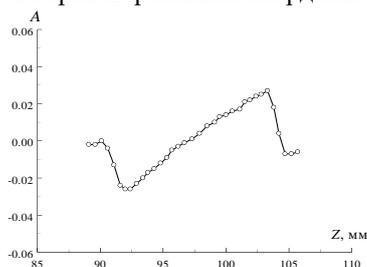


Рис. 1. Распределение нормированной величины массового расхода по поперечной координате z , $A = \frac{\rho U}{\rho U_\infty} - \overline{\left(\frac{\rho U}{\rho U_\infty}\right)}$

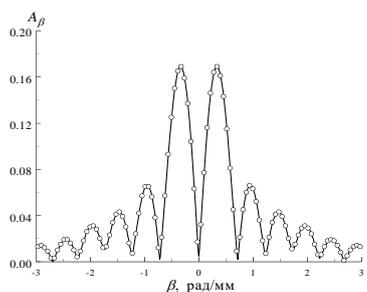


Рис. 2. Волновой спектр амплитуды стационарного возмущения (N-волны) в свободном потоке (см. рис.1.)

Оно соответствует N-волне в свободном потоке перед кромкой модели. Рис. 2 демонстрирует волновой спектр амплитуды стационарного возмущения (N-волны) в свободном потоке. Размерность амплитуды одинакова с исходными данными благодаря нормировке в процедуре ДПФ. Волновые амплитудные спектры стационарных возмущений, порожденных в пограничном слое пластин с радиусами передней кромки 0,04 мм и 0,5 мм приведены на Рис. 3. Они получены в пограничном слое на удалении 60 мм от кромок. Результаты позволяют сделать оценки относительных значений амплитуд по волновым числам. Предполагается использовать процедуры вариации пространственных распределений в пределах величины неопределенности измерения координаты z .

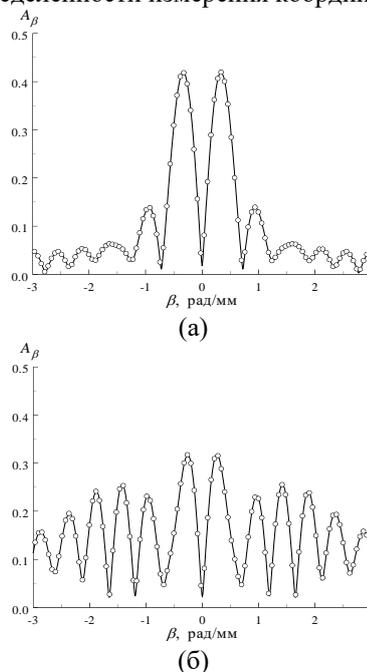


Рис. 3. Волновой спектр амплитуды стационарного возмущения, порожденного в пограничном слое пластины с радиусом притупления (а) 0,04 мм; (б) 0,5 мм.

Установлено усиление стационарных возмущений, порождаемых N-волной в пограничном слое.

Список литературы:

1. Косинов А.Д., Семенов Н.В., Яцких А.А., Кочарин В.Л., Шмакова А.В. Влияние радиуса притупления передней кромки пластины на отклик пограничного слоя при воздействии N-волны при числе Маха $M = 2$ // Теплофизика и Аэромеханика. 2023. Т. 30 № 2. С. 1–11.
2. Din Q.H., Egorov I.V., Fedorov A.V. Mach wave effect on laminar-turbulent transition in supersonic flow over a flat plate // Fluid Dynamics. 2018. V. 53, № 5. P. 690–701.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-19-00666, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00666>

УДК 532.542.4, 532.574.7, 532.582.3

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКАДРОВОГО PIV ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ЗА ЦИЛИНДРОМ С ГИДРОФОБНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Лебедев А.С., Сорокин М.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Для уменьшения лобового сопротивления тел, находящихся в потоке жидкости, применяют активные и пассивные методы управления отрывными течениями. Активные методы управления позволяют достичь уменьшения лобового сопротивления до 80% [1] и более. Однако, активные методы управления энергозатратны и сложны в реализации. В свою очередь пассивные методы управления, при меньшей эффективности, просты в эксплуатации и могут быть использованы как самостоятельно, так и вместе с активными методами управления. Одним из таких методов управления является использование гидрофобных покрытий [2]. Изготовление микро и нано структурированных поверхностей позволяет значительно увеличить краевой угол смачивания, вплоть до значений, когда поверхность начинает считаться супергидрофобной - 150° и более.

В работе [3] продемонстрирована эффективность секторальных гидрофобных покрытий в качестве метода управления отрывом потока при большем числе Рейнольдса ($Re = 2,2 \times 10^5$). Показано, что секторальное покрытие гидрофобным фторполимером позволяет управлять турбулентным следом за цилиндром, задерживая отрыв потока с одной стороны. Эта приводит к наклону траектории крупномасштабных вихревых структур. Визуализация с высоким разрешением указывает на то, что этот эффект связан с перемещением микропузырьков по поверхности с покрытием. Свойства покрытий и наличие микропузырьков оставались постоянными даже после многих часов непрерывной работы установки.

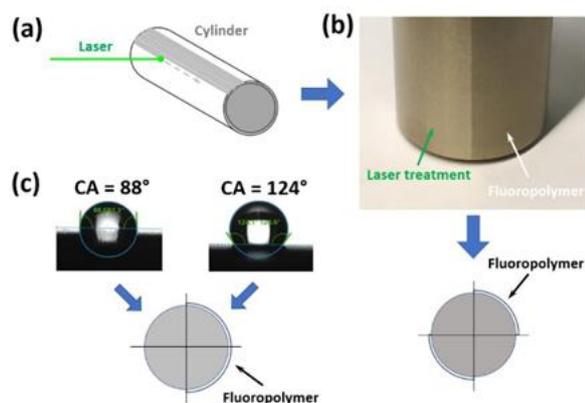


Рис. 1 [3]. а) Схема удаления фторополимера с поверхности стального цилиндра. б) Фотография цилиндра после удаления слоя фторополимера. в) Измерение краевого угла смачивания.

Для исследования спектральных характеристик пульсаций скорости, данные, полученные в ходе ра-

боты [3] были обработаны с применением двухкадрового кросскорреляционного алгоритма и многокадрового пирамидального корреляционного алгоритма [4]. Пирамидальная корреляция использовалась для повышения точности PIV измерений, а также компенсирует случайные ошибки и ошибки смещения. Новизна метода заключается в использовании линейной комбинации корреляционного сигнала для различных интервалов временной задержки между кадрами. Полученная корреляционная функция, усредненная по ансамблю кадров, имеет заметно большее отношение сигнал/шум и более точную оценку скорости, чем корреляционная функция, полученная по двум последовательным изображениям. Достоверность работоспособности пирамидальной корреляции основана на предположении о постоянстве скорости в течение времени наблюдения ансамбля кадров, поэтому для её реализации требуются данные с высоким временным разрешением. Поэтому многокадровый метод подходит для повышения надежности и точности экспериментов, проводимых с использованием CMOS камер/лазеров с высокой частотой съемки/импульсов, особенно, когда изображения получены при неоптимальных условиях.

В представленной работе было проведено сравнение полей скорости, полученных с использованием двухкадрового кросскорреляционного и многокадрового кросскорреляционного алгоритма.

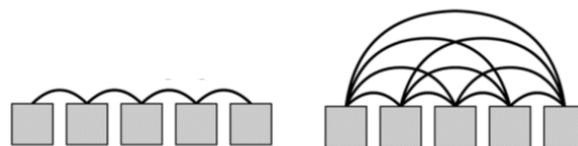


Рис. 2. Схемы использования соседних кадров при расчете поля скорости двухкадровым кросскорреляционным и многокадровым кросскорреляционным методом.

Список литературы:

1. Tokumaru P. T., Dimotakis P. E. Rotary oscillation control of a cylinder wake //Journal of Fluid Mechanics. 1991. Т. 224. С. 77-90.
2. Rothstein J. P. Slip on superhydrophobic surfaces //Annual review of fluid mechanics. 2010. Т. 42. С. 89-109.
3. Lebedev A. et al. Control of the turbulent wake flow behind a circular cylinder by asymmetric sectoral hydrophobic coatings //Physics of Fluids. 2021. Т. 33. №. 12. С. 121703.
4. Sciacchitano A., Scarano F., Wieneke B. Multi-frame pyramid correlation for time-resolved PIV //Experiments in fluids. 2012. Т. 53. С. 1087-1105.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в ИТ СО РАН

УДК 532.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЛАМИНАРИЗАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ПОМОЩЬЮ НАПРАВЛЕННОЙ ВДОЛЬ ПОТОКА СИСТЕМЫ СОТ

Лукиянов А.А.^{1,2}, Пантелеев С.А.^{1,2}, Зарипов Д.И.^{1,3}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1³ Институт энергетики и перспективных технологий КазНЦ РАН,
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

Управление параметрами потока с целью уменьшения поверхностного трения представляет большой интерес для широкого спектра прикладных задач. Существует большое многообразие методов управления, большинство из которых основано на идее частичной ламинаризации турбулентного течения [1-3]. В работе [4] было предложено использование специального устройства, представляющего систему направленных вдоль потока сот, с помощью которого удалось полностью ламинаризовать развитое турбулентное течение и снизить тем самым гидравлическое сопротивление до уровня ламинарного течения. Однако применение такого устройства привело к существенному местному гидравлическому сопротивлению. В данной работе предпринята попытка модернизации рассмотренного в [4] устройства с целью повышения его гидравлической эффективности.

Для этого было рассмотрено развитое турбулентное течение воды в оптически прозрачном цилиндрическом канале длиной 5 м в диапазоне чисел Рейнольдса $2000 < Re < 5000$, где $Re = U_b D / \nu$, U_b – среднерасходная скорость, D – диаметр канала, ν – коэффициент кинематической вязкости. Для того чтобы убедиться в подобии исследуемых процессов, были рассмотрены каналы с диаметрами 0,016 и 0,032 м.

При исследовании механизма реламинаризации рассматривалось несколько конфигураций устройств, характеризующихся различной степенью местного гидравлического сопротивления. Все устройства были изготовлены по технологии фотополимерной 3D-печати на SLA принтере. На рис. 1а показано используемое в данной работе устройство НС (НС – HoneyComb), представляющие систему сот с постоянной по радиусу трубы длиной D и гидравлическим диаметром $d = D/15$.

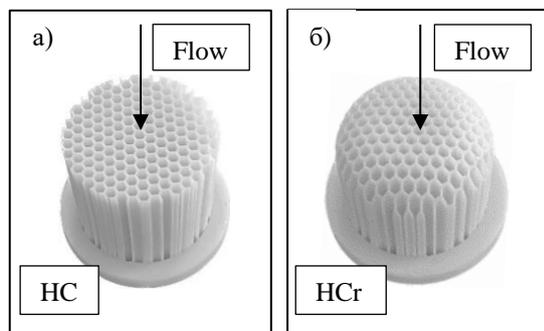


Рис.1. Устройства (а) НС и (б) НСr.

Также было рассмотрено устройство НСr с закругленными краями радиусом $D/3$ на внешней границе, как показано на рис. 1б.

В этом случае соты, расположенные у стенок, были короче, чем в ядре потока. Это позволило сформировать М-образный профиль скорости за этим устройством для обеспечения, согласно [5], необходимого условия реламинаризации исходно турбулентного потока. Эти устройства устанавливались на расстоянии $70D$ от входа в рабочий участок ниже по потоку, где течение было развитым, в смысле автомодельности характеристик потока вдоль рабочего участка. Измерения были выполнены в поперечном сечении канала на расстояниях $6D$ и $120D$ за устройствами с использованием высокоскоростного метода Particle Image Velocimetry [6] с высоким пространственно-временным разрешением. Результаты измерений профилей скорости и турбулентных пульсаций показали возможность полной реламинаризации исходно развитого турбулентного течения в цилиндрическом канале. Были получены ламинарные профили скорости на расстоянии $120D$ вниз по потоку от устройства НСr, обладающего большей, чем в работе [4], гидравлической эффективностью, вплоть до $Re = 3810$. Предварительные экспериментальные данные показали, что механизм реламинаризации связан с формированием М-образного профиля продольной скорости за рассматриваемым устройством.

Список литературы:

1. Kim J.S. et al. Influence of a large-eddy breakup device on the frictional drag in a turbulent boundary layer // Phys. Fluids. 2017. Vol. 29, № 6.
2. Krieger V. et al. Toward design of the antiturbulence surface exhibiting maximum drag reduction effect // J. Fluid Mech. 2018. Vol. 850. P. 262–303.
3. Bradshaw P., Pankhurst R.C. The design of low-speed wind tunnels // Prog. Aerosp. Sci. 1964. Vol. 5, № 5. P. 1–69.
4. Kühnen J., Scarselli D., Hof B. Relaminarization of Pipe Flow by Means of 3D-Printed Shaped Honeycombs // J. Fluids Eng. 2019. Vol. 141, № 11. P. 1–7.
5. Kühnen J. et al. Destabilizing turbulence in pipe flow // Nat. Phys. Springer US, 2018. Vol. 14, № 4. P. 386–390.
6. Ахметбеков Е.К. et al. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислительные методы и программирование. 2006. Vol. 7, № 2. P. 79–85.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-29-01274,
<https://rscf.ru/project/22-29-01274/>

УДК 533.694.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРУЙНОГО ВИХРЕГЕНЕРАТОРА

Маркин В.В., Поливанов П.А.

Институт Теоретической и Прикладной Механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Отрыв потока, возникающий на несущих поверхностях летательных аппаратов, представляет опасность при эксплуатации воздушных судов, особенно на взлетно-посадочных режимах. Одним из способов подавления отрывной области является использование вихрегенераторов ([1], [2]). На данный момент существует различные способы генерации продольных вихрей. Наиболее распространенным способом является использование механических устройств, что обусловлено простотой их реализации. Недостатком таких устройств является дополнительное сопротивление, возникающее на безотрывных режимах обтекания. Альтернативным методом создания продольного вихря являются струйные вихрегенераторы [3], которые не создают паразитного сопротивления, но для функционирования которых необходима дополнительная энергия, которая, например, может отбираться от двигателя летательного аппарата. Поэтому важным вопросом становится эффективность создания продольного вихря данным методом. В данной работе предложен способ определения эффективности струйного вихрегенератора на примере расчетного исследования на плоской пластине с искусственным отрывом.

Расчеты были проведены при помощи RANS подхода с использованием модели турбулентности $k-\omega$ SST в пакете Ansys Fluent. Параметр y^+ на стенке был близок к единице. Расчеты выполнены для скорости набегающего потока $U = 25$ м/с. Струйный вихрегенератор располагался на расстоянии $X = 0,5$ м от передней кромки, где толщина турбулентного пограничного слоя равнялась $\delta_i \approx 10 \cdot 10^{-3}$ м. Геометрия основной расчетной области (область развития пограничного слоя на пластине) была выбрана следующей: ширина расчетной области приблизительно равна $13\delta = 130$ мм, высота 150-200 мм. Диаметр сопла вихрегенератора составлял около $0,1-0,5\delta$ (1-5 мм). Длина расчетной области составляла 300 мм. Поскольку на входной границе задавались параметры пограничного слоя, предварительно рассчитанные для координаты $X = 450$ мм, то расчетная область охватывает физическую область течения $X = 450 - 750$ мм. Граничные условия и расчетная область были выбраны на основе экспериментальных данных, которые были получены для верификации расчета.

Для моделирования отрыва пограничного слоя на плоской пластине было решено использовать объемный источник силы, направленной против потока. Для этого в уравнениях движения воздушной среды задавался дополнительный объемный источник – сила F . Зона действия этой силы занимала всю ширину пластины, имела форму параллелепипеда высотой 20 мм

и длиной 50 мм, и начиналась: в вертикальном направлении – у стенки ($Y = 0$ мм), в продольном направлении – в сечении $X = 0,59$ м.

В ходе расчетов были получены данные о формируемом вихре (см. рис. 1) и его влиянии на поток. На рис. 1 представлено распределение дефекта продольной скорости, возникающего вследствие перемешивания вихрем пограничного слоя с внешним течением. Дефект скорости рассчитывался, как разница между скоростью невозмущенного и возмущенного потоков. Крестом обозначен центр вихря.

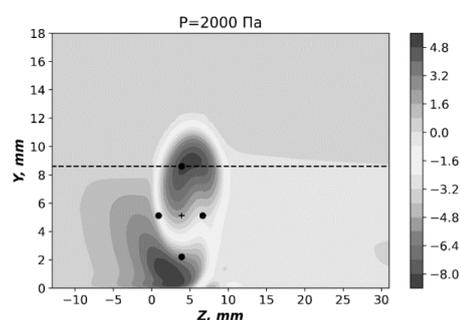


Рис. 1. Распределение дефекта продольной скорости (м/с) в поперечном сечении.

Оценка эффективности струйного вихрегенератора основывается на интегральном дефекте динамического напора F_{dyn} . Дефект динамического напора рассчитан как разница между динамическим напором возмущенного и невозмущенного потоков и проинтегрирован по поперечному сечению расчетной области.

Использование подобного параметра позволяет оценить интегральное воздействие вихрегенератора на течение, а также сравнить между собой различные варианты устройств. Так, например, получено, что при повышении давления выдува или при увеличении количества отверстий вихрегенераторов параметр дефекта динамического напора возрастает. Установлено, что наилучшее подавление отрывного течения наблюдается для вариантов вихрегенераторов для которых величина F_{dyn} обладает максимальным значением.

Список литературы:

1. Tejero F., Doerffer P., Flaszynski P., Szulc O. Investigation of Vortex Generators on Channels and Airfoils // Recent Progress in Flow Control for Practical Flows. Springer International Publishing. 2017. pp. 137–154.
2. Küpper, D. A study of the application of air-jet vortex generators to intake ducts. Unpublished Doctoral thesis, City University London. 1999.
3. Radespiel R., Burnazzi M., Casper M., Scholz P. Active flow control for high lift with steady blowing // The Aeronautical Journal. 2016. Vol. 120. No. 1223. pp. 171–200.

УДК 532.526

ОСОБЕННОСТИ ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ МАЛОРАЗМЕРНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КЛАССИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

Мельник Е.А., Павленко А.М., Алпацкий Н.С., Каприлевская В.С., Занин Б.Ю.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

На протяжении многих лет одной из важных задач аэродинамики является проблема улучшения обтекания крыла, которая напрямую связана с устранением отрывных течений [1], негативно сказывающихся на аэродинамических характеристиках летательного аппарата (ЛА). При решении этой проблемы необходимо учитывать аэродинамическую интерференцию, поскольку в большинстве случаев она приводит к возрастанию суммарного сопротивления и к уменьшению подъемной силы ЛА [2]. Исходя из этих соображений, проведение исследований, направленных на изучение влияния различных элементов летательного аппарата на структуру обтекания крыла является весьма актуальной задачей.

Данная работа нацелена на экспериментальное исследование влияния фюзеляжа, элеронов и работы распределенной силовой установки на вихревую структуру течения на прямом крыле и является продолжением цикла исследований, посвященных изучению отрывных течений и возможностей управления обтеканием различной компоновки моделей малоразмерных летательных аппаратов [3-5].

Эксперименты были проведены в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 на спроектированной авторами доклада модели малоразмерного летательного аппарата с прямым крылом (см. рис. 1). Модель имеет следующие геометрические размеры: размах крыла – 0,75 м, хорда – 0,15 м, длина фюзеляжа – 0,7 м, максимальный диаметр фюзеляжа – 0,085 м. За задней кромкой крыла была расположена распределенная силовая установка, включающая 6 двигателей (импеллеров). Рассматривалось два положения двигателей. Сначала двигатели устанавливались над крылом, затем они устанавливались так, чтобы ось вращения винта была на уровне задней кромки.

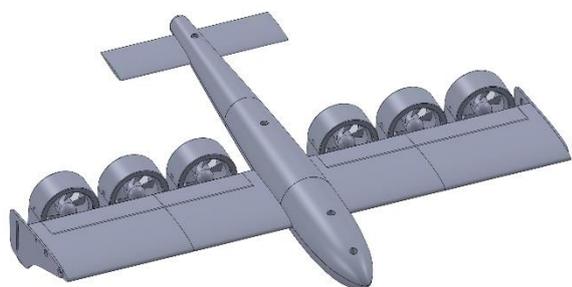


Рис. 1. Проект модели малоразмерного летательного аппарата с прямым крылом.

Исследования проводились при различных углах атаки, не превышающих 14° . Скорость набегающего потока составляла 25 м/с, число Рейнольдса по хорде $Re=2,5 \times 10^5$.

Для реализации визуализации картины течения применялся метод «саже-масляных» покрытий. Прежде чем пропустить модель в трубе, на верхнюю поверхность крыла наносилась специальная смесь из порошка двуокиси титана и керосина. Под воздействием набегающего потока керосин постепенно испарялся, а порошок двуокиси титана оставался, проявляя осредненную по времени структуру течения.

В результате проведенных экспериментов были получены картины визуализаций обтекания модели при различных режимах и углах отклонения элеронов. Показано, что работа распределенной силовой установки влияет на структуру течения на крыле (см. рис. 2).

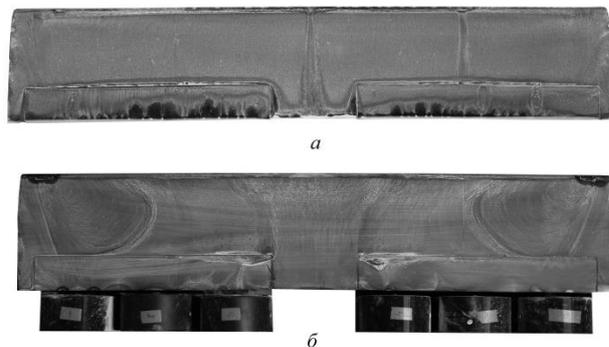


Рис. 2. Результаты «саже-масляной» визуализации на угле атаки 10° : а – без двигателей; б – с работающими двигателями.

Список литературы:

1. Чжен П. Отрывные течения: в 3 т. / П. Чжен. М.: Мир, 1972. Т.1. 300 с.
2. Л.Ф. Николаев "Основы аэродинамики и динамики полета транспортных самолетов", 1990, 392 с.
3. Павленко А. М., Занин Б. Ю., Катасонов М. М. Исследования обтекания модели летающего крыла при натуральных числах Рейнольдса // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2015. Т. 10. №. 3. С. 19–25. Суржиков С.Т. Перенос излучением в неоднородном слое // ТВТ. 1997. Т. 35. № 3. С. 1-2.
4. Pavlenko A.M., Zanin B.Yu., Katasonov M.M. Flow around a small-sized UAV model in a turbulent trace // XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018) (Novosibirsk, Russia, 13–19 Aug., 2018): AIP Conference Proceedings. SI.: 2018. Vol. 2027 No. 1. P. 040004(7). DOI: 10.1063/1.5065278
5. Alpatskiy N.S., Pavlenko A.M., Bykov A.V., Zanin B.Y. Investigation of the influence of controls on the flow around the UAV model // The XXXVII Siberian Thermophysical Seminar (STS37) 2021 DOI:10.1088/1742-6596/2119/1/012008

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-29-00309,
<https://rscf.ru/project/22-29-00309/>

УДК 532.526.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕОРИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ, РАЗВИТИЯ И
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ПОГРАНСЛОЙНЫХ ТЕЧЕНИЯХ****Мищенко Д.А.**Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Одной из важнейших проблем современной механики жидкостей и газов является проблема ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП), которая помимо большой научной (фундаментальной) важности также имеет множество практических приложений. В ламинарных погранслойных течениях при малых дозвуковых скоростях наблюдается несколько типов неустойчивостей способных приводить к ЛТП. Такими неустойчивостями прежде всего являются: (а) неустойчивость Толлмина-Шлихтинга (ТШ), (б) неустойчивость поперечного течения (ПТ) (в трёхмерных пограничных слоях, например, на стреловидных крыльях) и (в) неустойчивость Гёртлера (в течениях с искривленными линиями тока, например, в пограничных слоях на вогнутых поверхностях).

Линейная теория устойчивости занимает особое место в области изучения явлений, связанных с ЛТП. В частности, эта теория является ключевым элементом современных инженерных методов расчёта положения ЛТП, а также служит для верификации перспективных теоретических и численных нелинейных подходов к описанию ЛТП на начальных стадиях развития возмущений. Вследствие этого, верификация линейной теории современными высокоточными экспериментальными данными является важнейшей фундаментальной и практически важной задачей. Большое фундаментальное и практическое значение имеют также подробные количественные экспериментальные данные, пригодные для верификации различных теорий локализованной и распределенной восприимчивости, а также теорий слабонелинейного развития возмущений. В настоящем докладе приведены результаты обширных систематических экспериментальных исследований указанных выше проблем в сложных погранслойных течениях при малых дозвуковых скоростях потоков, в условиях полностью контролируемых нестационарных возмущений.

Эксперименты проведены в двух малотурбулентных аэродинамических трубах – Т-324 (ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск) и МТЛ (КТН, г. Стокгольм) в пограничных слоях на высокоточных экспериментальных моделях с вогнутой поверхностью (радиус закругления 8.37 м) и скользящего крыла (установленного под углами атаки -5° и $+1,5^\circ$). В условиях экспериментов исследуемые пограничные слои были неустойчивыми либо к нестационарным (в общем случае) модам Гёртлера, либо к нестационарным (в общем случае) вихрям ПТ, либо к волнам ТШ.

Верификация с помощью соответствующих экспериментальных данных всех основных характеристик устойчивости указанных погранслойных течений, рассчитанных с помощью *локальной параллельной (ЛПТ)* и *нелокальной непараллельной (ЛНТ)* линейной теории устойчивости, показала, что обе теории пра-

вильно описывают развитие мод всех трёх типов неустойчивости. При этом ЛНТ способна предсказывать их инкременты несколько точнее. (Для гёртлеровских мод ЛНТ может использоваться только для быстро нарастающих возмущений.)

В серии подробных количественных экспериментов исследованы три, предположительно наиболее эффективные, механизма порождения нестационарных мод гёртлеровской неустойчивости: (1) локализованными (в продольном направлении) вибрациями поверхности; (2) за счет рассеяния трехмерных и двумерных вихревых возмущений набегающего потока на локализованных неоднородностях стенки; а также (3) за счет распределенного рассеяния трёхмерных вихрей набегающего потока не естественной неоднородности нарастающего пограничного слоя. Обнаружено, что группа механизмов (2) является совершенно неэффективной и в разумном диапазоне параметров возмущений не способна приводить к возбуждению гёртлеровских мод. Механизм (1), в свою очередь, способен приводить к генерации в пограничном слое нестационарных вихрей Гёртлера, однако его эффективность относительно невелика. Соответствующие коэффициенты вибрационной восприимчивости хорошо (с учетом сложности задачи их определения) согласуются с расчетами, выполненными с использованием подхода, основанного на применении оптимальных возмущений. В то же время, было обнаружено, что механизм распределенной восприимчивости (3) не только способен приводить к эффективной генерации стационарных и нестационарных гёртлеровских мод, но также может существенно изменять скорости их нарастания вниз по потоку. Соответствующие коэффициенты распределенной вихревой восприимчивости получены в широком диапазоне параметров задачи. Судя по всему, этот механизм является одним из основных при порождении вихрей Гёртлера в неконтролируемых («естественных») условиях.

Экспериментально исследована слабонелинейная стадия развития неустойчивости Гёртлера, получены пороги ее нелинейности. Показано, что нелинейная непараллельная теория устойчивости (А.В. Бойко) качественно правильно описывает основные особенности проявления первых нелинейных эффектов. Обнаружен эффективный механизм подавления нестационарных гёртлеровских мод высокоамплитудными стационарными вихрями Гёртлера. Его эффективность существенно зависит от фазовых соотношений между указанными возмущениями. Эти данные подтверждают расчёты в рамках слабонелинейной теории.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты 121030500149-8 и АААА-А19-119051590050-2)

УДК 532.526

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ МОДЕЛИ ЛЕТАЮЩЕГО КРЫЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА

Павленко А.М., Занин Б.Ю., Мельник Е.А., Алпацкий Н.С.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Хорошо известно, что во время крейсерского режима полета на поверхности крыльев летательных аппаратов могут образовываться локальные зоны отрыва при дозвуковых скоростях [1-2]. С увеличением угла атаки область локального отрыва смещается в сторону передней кромки вплоть до полного ее исчезновения. При этом вблизи задней кромки крыла начинает формироваться отрыв турбулентного пограничного слоя. Дальнейшее увеличение угла атаки до критических значений приводит к срыву потока с передней кромки, формированию крупномасштабных вихрей и возвратному течению.

Наличие источников стационарного возмущения на поверхности крыльев может приводить к изменению структуры отрывного течения, вплоть до полного его устранения в зависимости от режима обтекания [3-6]. Новым направлением исследований является изучение влияния внешних возмущений на структуру отрывных течений [7]. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований, которые являются результатом продолжения целого комплекса работ по изучению обтекания летательного аппарата при попадании в турбулентный след. В связи с бурным развитием малоразмерной беспилотной авиации актуальность данных исследований не вызывает сомнений.

Эксперименты проводились в двух дозвуковых аэродинамических трубах мТ-324 и Т-324 ИТПМ СО РАН г. Новосибирск (Россия).

Исследование проводилось на моделях крыльев с прямой и стреловидной передней кромкой, размеры которой представлены на рисунке 1. Размах прямого крыла составляла 200 мм, хорда - 100 мм. В качестве источника внешних возмущений применялась три вида ворсистой нити диаметром 0,5, 1,5 и 3 мм и три лески диаметром 0,8, 2 и 3 мм. Одна определённая нить (леска) натягивалась выше по течению перед моделью и создавала турбулентный след за собой, который набегал на модель крыла.

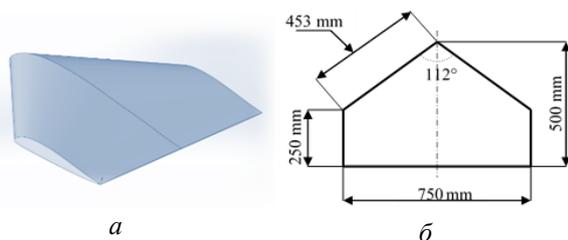


Рис. 1. Модель со стреловидной передней кромкой (а) и геометрические размеры крыла (б).

В качестве основного метода исследований применялась саже-масляная визуализация. Для получения количественных данных о структуре течения за нитью и леской применялся метод термоанемометрии.

Проведены исследования структуры течения в пограничном слое моделей летающего крыла при различных уровнях турбулентности набегающего потока при закритических углах атаки. Получены картины визуализации предельных линий тока вблизи поверхности моделей для каждого случая. Получены количественные данные о структуре следа за ворсистой нитью и леской. Проведен сравнительный анализ полученных результатов. Было обнаружено, что при определенных условиях на стреловидном крыле возможны два вида обтекания при попадании в турбулентный след. Влияние турбулентного следа может привести как к полному присоединению потока, так и к частичному. Частичное присоединение потока подразумевает под собой наличие одного крупномасштабного вихря на половине крыла и присоединенное обтекание на другой половине крыла. Такой режим обтекания может привести к драматическим последствиям во время полета летательного аппарата, ввиду отсутствия подъемной силы на половине крыла. Было найдено, что существует определенная область в пространстве относительно модели крыла, установив в которую источник турбулентного следа, можно добиться стабильного и присоединенного течения вблизи поверхности модели крыла.

Список литературы:

1. Бойко А.В., Довгаль А.В., Занин Б.Ю., Козлов В.В. Пространственная структура отрывных течений на крыловых профилях (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3. No. 1. С. 1-14.
2. Traub L.W., Cooper E. Experimental Investigation of Pressure Measurement and Airfoil Characteristics at Low Reynolds Numbers // Journal of aircraft. 2008. 45(4). 1322-1333. DOI: 10.2514/1.34769
3. Павленко А.М., Занин Б.Ю., Катасонов М.М., Зверков И.Д. Преобразование структуры отрывного течения с помощью локального воздействия // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. No. 1. С. 17 - 22.
4. Занин Б.Ю., Козлов В.В., Павленко А.М. Управление отрывом на модели крыла при малых числах Рейнольдса // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2012. No. 3. С. 133-140.
5. Павленко А.М., Занин Б.Ю., Катасонов М.М. Исследования обтекания модели летающего крыла при натуральных числах Рейнольдса // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2015. Т. 10. No. 3. С. 19-25.
6. Бойко А.В., Довгаль А.В., Занин Б.Ю., Козлов В.В., Лушин В.Н., Сызранцев В.В. Топология глобального отрыва на модели крыла в присутствии источников стационарных возмущений // Теплофизика и аэромеханика. 1995. Т. 2. No. 1. С. 37 - 45.
7. Pavlenko A.M., Zanin B.Y., Katasonov M.M. 2018 AIP Conference Proceedings 2027 edited by V.M. Fomin NY American Institute of Physics Melville. 030060. DOI: 10.1063/1.5065278

Работа была выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 гг. (номер гос. регистрации: 121030500149-8). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Механика»

УДК 533.17, 532.517.4

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЕМ В ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЕ МОДЕЛЬНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ ФРЕНСИСА С ПОМОЩЬЮ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ИНЖЕКЦИИПалкин Е.В.¹, Лутченко И.И.^{1,2}, Хребтов М.Ю.¹, Мулладжанов Р.И.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

На сегодняшний день гидроэнергетика является одним из наиболее перспективных возобновляемых источников энергии. Она играет ключевую роль в переходе к чистой энергии, но также способна обеспечивать гибкость и хранение энергии. Радиально-осевые турбины относятся к наиболее распространенным типам турбин, которые могут эксплуатироваться при форсированных и частичных нагрузках генератора. В таких режимах в потоке может формироваться когерентная вихревая структура - прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ). Она представляет собой спиральный вихрь, возникающий за рабочим колесом, который мандрирует вниз по потоку в отсасывающей трубе. Она создает пульсации давления, которые могут приводить к резонансным явлениям и изнашивают конструкцию гидротурбины [1].

Для подавления ПВЯ в лабораторных установках применяют различные способы пассивного и активного управления потоком. Наиболее апробированным активным методом является использование аксиальных инъекций струй постоянного или пульсирующего расхода в местах наибольшей восприимчивости потока к возмущениям [2-3].

С помощью вихреразрешающего подхода мы численно исследуем течение в модельной воздушной турбине Фрэнсиса-99, полностью соответствующей лабораторной установке в Институте теплофизики СО РАН [4] (см. рис. 1). Модельная геометрия состоит из стационарного и вращающегося с постоянной угловой скоростью завихрителя. Расчеты проводились с помощью пакета OpenFOAM [5] с открытым исходным кодом, основанным на методе конечных объемов, имеющим второй порядок точности как по времени, так и по пространству. Для режима частичной загрузки гидротурбины $Q = 87,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ (число Рейнольдса $Re = 19\,300$) была проведена верификация расчетов и получено хорошее соответствие с экспериментальными данными.

В докладе будут представлены численные и экспериментальные распределения компонент поля скорости и пульсаций скорости, а также численные данные, полученные при управлении радиально-осевой инъекцией малого расхода.

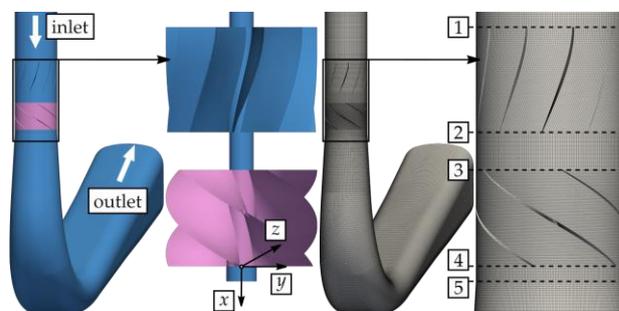


Рис. 1. Геометрия модельной гидротурбины (слева) и соответствующая ей расчетная сетка (справа). Геометрия состоит из входа, стационарного завихрителя, вращающегося с постоянной угловой частотой завихрителя и отсасывающей трубы. Все поверхности соответствуют непроницаемым стенкам, розовым цветом обозначен вращающийся с постоянной угловой частотой 40.53 Гц завихритель. Также отмечены декартова система координат, направление входа и выхода. На правом рисунке цифрами обозначены $x = \text{const}$ положения неконформных сеточных интерфейсов, разделяющие вычислительную сетку на блоки. Стенки блока, находящегося между интерфейсами 3 и 4 вращаются с постоянной угловой частотой, а стенки остальных блоков стационарны.

Список литературы:

1. Trivedi C., Cervantes M. Fluid-structure interactions in Francis turbines: A perspective review. //Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Т. 68. С. 87–101.
2. Tănașă C, Muntean S, Bosioc AI, Susan-Resiga R, Ciocan T. Influence of the air admission on the unsteady pressure field in a decelerated swirling flow //UPB Sci. Bull. Ser. D. 2016. Т. 78. №. 3. С. 161–170.
3. Kirschner O, Schmidt H, Ruprecht A, Mader R, Meusburger P. Experimental investigation of vortex control with an axial jet in the draft tube of a model pump-turbine // IOP conference series: earth and environmental science. IOP Publishing, 2010. Т. 12. №. 1. С. 012092.
4. Litvinov I., Shtork S., Gorelikov E., Mityrakov A., Hanjalic K. Unsteady regimes and pressure pulsations in draft tube of a model hydro turbine in a range of off-design conditions // Exp. Therm. Fluid Sci., 2018. Т. 91. С. 410–422.
5. Weller H., Tabor G., Jasak H., Fureby C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. //Computers in physics. 1998. Т. 12, С. 620–631.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации Российской экономики, грант № СП-829.2021.1. Разработка вычислительного кода выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН

УДК 532.526

УПРАВЛЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯМИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ, ВОЗНИКАЮЩИМИ ПРИ БЕЗОТРЫВНОМ ОБТЕКАНИИ СКОЛЬЗЯЩЕГО КРЫЛА С ПОМОЩЬЮ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОТСОСА

Садовский И.А., Катасонов М.М.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Отсасывание пограничного слоя является эффективным способом управления ламинарно-турбулентным переходом. Воздействие отсоса газа на поток проявляется в виде уменьшения толщины пограничного слоя, а, следовательно, изменение его восприимчивости возмущениям. Наиболее эффективным в смысле подавления амплитуды возмущений является распределенный отсос. Например, в работе [1] рассматривается воздействие распределенного отсоса через поперечную щель на развитие нелинейных возмущений в пограничном слое. В этой же работе были определены условия, при которых отсасывание газа как средство ламинаризации потока является эффективным.

С развитием технологий электронно - лучевой обработки стало возможным получение мелкоперфорированных металлических поверхностей в промышленных объемах. Это особенно интересно для инженеров – авиастроителей, так как такие поверхности могут быть гидродинамически - гладкими, т.е. шероховатости настолько малы, что поток не реагирует на них. В работе [2] проводилось исследование влияния распределенного отсоса через гидродинамически – гладкую проницаемую поверхность на развитие естественных и акустически усиленных возмущений в пограничном слое скользящего крыла в условиях отрыва. Авторам удалось добиться подавления возмущений. Известно, что в условиях отрыва возмущения активно нарастают и устранение отрыва в результате воздействия распределенного отсоса на среднее течение могло внести основной вклад в полученный результат.

В данной работе проводится исследование воздействия распределенного отсоса через мелкоперфорированную гидродинамически – гладкую поверхность на собственные и усиленные с помощью акустики возмущения пограничного слоя в условиях безотрывного течения, а так же поднимается вопрос о минимально необходимой мощности отсоса для подавления возмущений. Эксперимент выполнялся в рабочей части малотурбулентной аэродинамической трубы Т-324 ИТПМ СО РАН. Модель представляла собой участок скользящего крыла с хордой $s = 807$ мм и размахом $z = 950$ мм. На расстоянии $0,5s$ по хорде от передней кромки вровень с поверхностью была вмонтирована проницаемая гидродинамически – гладкая вставка, через которую осуществлялся распределенный отсос. Проницаемость поверхности составляла 17% и достигалась за счет пор круглого сечения диаметром $0,17$ мм расположенных в шахматном порядке. Передний край поверхности находится на координате $x = 280$ мм, что соответствует области неблагоприятного градиента давления. Предполагается, что в этой области происходит нарастание возмущений. Модель была

установлена под углом атаки $\alpha = -6^\circ$, скорость набегающего потока $U_\infty = 15$ м/с. Скорость отсасываемого газа у поверхности варьировалась от $U_s = 0$ до $1,8$ м/с методом регулирования напряжения, подаваемого на насос с помощью ЛАТР и была измерена термоанемометром в отсутствии основного потока. Неравномерность отсоса по поверхности не превышает $0,05$ м/с.

Так же в работе применяется усиление естественных возмущений звуковой волной на основной частоте естественных пульсаций, которая определяется из спектрального анализа. Схожим методом воспользовались авторы [3].

Исследование профилей средней скорости показало, что в данных условиях реализуется безотрывное течение. Профили пульсаций скорости вниз по потоку показывают активный рост естественных возмущений, начиная с координаты $x = 360$ мм. Рост возмущения проходит по сценарию ламинарно – турбулентного перехода при низкой степени турбулентности набегающего потока и набирает амплитуду $12\% U_\infty$ в конце области измерений. Измерения амплитуды пульсаций скорости в конце области измерений при $y = Y_{\max}$, даёт понять, что в данных условиях для подавления возмущения достаточно $U_s = 0,53$ м/с. При таких параметрах начальная и конечная амплитуда возмущений не отличаются и составляют около $0,25\% U_\infty$. Таким образом, происходит уменьшение амплитуды естественных пульсаций в 48 раз.

Проводилось усиление возмущения с помощью акустического поля частотой 200 Гц. Это привело к раннему активному росту возмущения (начиная с $x = 300$ мм) и амплитуде в конце области измерения порядка $18\% U_\infty$. Для подавления возмущений в этом случае мощность отсоса была поднята до $U_s = 0,65$ м/с. Был достигнут схожий результат, амплитуда возмущения в конце области уменьшилась в 60 раз.

Список литературы:

1. Козлов В.В., Левченко В.Я., Щербаков В.А. Развитие возмущений в пограничном слое при щелевом отсасывании // Учен. зап. ЦАГИ. 1978. Т. 9, № 2. С. 99–105.
2. Садовский И.А., Катасонов М.М., Козлов В.В. Моделирование собственных возмущений пограничного слоя и управление ими с помощью распределенного отсоса // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2022. No. 71. С. 146-155.
3. Dovgal A.V., Kozlov V.V., Simonov O.A. Sound excitation of boundary layer vibrations on a swept wing // TsAGI Research Notes. 1989. Vol. 20, No. 6, pp. 21-26.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект № 23-29-00670)*

*Ссылка на информацию о проекте:
<https://rscf.ru/project/23-29-00670/>*

УДК 534.222.2, 544.454.3

ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ КОЛЬЦЕВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ И КОЛЛЕКТОРЕ ВОЗДУХА ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

Самсонов А.Н., Быковский Ф.А., Ведерников Е.Ф., Тимофеев П.М.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

В настоящее время в России и за рубежом ведется интенсивное теоретическое и экспериментальное изучение непрерывного детонационного сжигания топлив по схеме Б.В. Войцеховского в поперечных детонационных волнах (ПДВ) [1,2]. Эти исследования рассматриваются как альтернатива обычному (дефлаграционному) горению в камерах сгорания (КС) газотурбинных и проточных двигателей, а также стационарных установок. Поскольку ударные волны, сопутствующие детонационному горению, заходят в систему подачи компонентов смеси и существуют на выходе из КС, они существенно влияют на процесс детонационного горения [3]. Цель работы – при непрерывной спиновой детонации (НСД) водород-воздушной смеси в кольцевой цилиндрической камере диаметром 503 мм измерить уровень давления в коллекторе воздуха, во фронте детонационной волны и на выходе из КС с помощью высокочастотных и низкочастотных (фирмы Trafag) датчиков давления. Сопоставить значения этих давлений.

Схема КС представлена на рис. 1, на которой приведены основные размеры КС и коллектора воздуха, а также места установки высокочастотных и низкочастотных датчиков давления в области фронта ПДВ (1) на расстоянии 70 мм от начала КС, перед входом в щель подачи воздуха $\delta = 10$ (2), у дальней от щели торцевой стенки коллектора (3) и на выходе из КС (4).

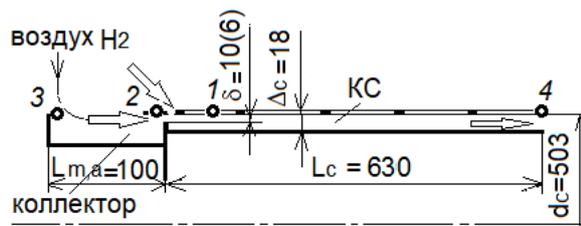


Рис. 1. Схема КС; 1, 2, 3, 4 – датчики давления

Подача воздуха, водорода в КС и выход продуктов детонации представлено стрелками. В пределах изменения расходов: воздуха $G_a = 7 \div 12$ кг/с, водорода $G_f = 0.08 \div 0.14$ кг/с и коэффициента избытка горючего $\phi = 0.35 \div 0.45$ реализованы двухволновые ($n = 2$) режимы НСД со скоростями ПДВ $D = 1310 \div 1504$ м/с.

При $G_a = 7$ кг/с, $G_f = 0.08$ кг/с и $\phi = 0.4$ в КС вращаются две ПДВ с $D = 1310$ м/с и с амплитудой: во

фронте, $p_f = 8 \cdot 10^5$ Па, в коллекторе (2) $p_{m,a} = 8.5 \cdot 10^5$ Па и на выходе из КС (4), $p_{ex} = 1.4 \cdot 10^5$ Па при среднем давлении в указанных точках $\langle p_f \rangle = 2.4 \cdot 10^5$ Па, $\langle p_{m,a} \rangle = 4.3 \cdot 10^5$ Па, $\langle p_{ex} \rangle = 1.2 \cdot 10^5$ Па. Таким образом, отношение максимального давления к среднему $p/\langle p \rangle$ составляет: во фронте ПДВ – 3.3, на входе в КС – 2 и на выходе из КС – 1.1 (см. рис. 2).

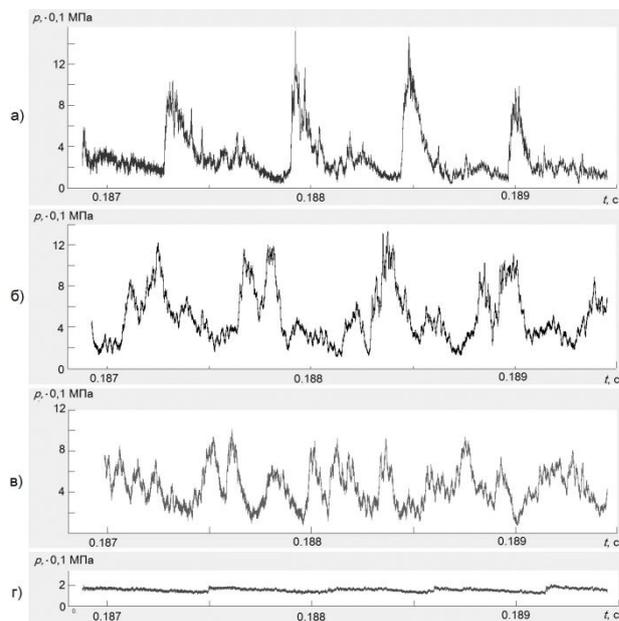


Рис. 2. График изменения давления в точке 1 – (а), 2 – (б), 3 – (в), 4 – (г).

Список литературы:

1. Войцеховский Б.В. Стационарная детонация // Докл. АН СССР. 1959. Т.129, №6. С. 1254-1256.
2. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
3. Ждан С.А., Рыбников А.И., Симонов Е.В. Моделирование непрерывной спиновой детонации водородовоздушной смеси в кольцевой цилиндрической камере сгорания // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. №2. С.95-106. DOI 10.15372/FGV20200212.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований № 2.3.1.2.4

УДК 532.627.2

ПОЛЯ ДАВЛЕНИЙ ПРИ ИМПАКТНОМ НАТЕКАНИИ ДВУХ КРУГЛЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУЙ С ОТЛИЧАЮЩИМИСЯ ЧИСЛАМИ РЕЙНОЛЬДСА

Сарсембенов Е., Терехов В.И., Терехов В.В., Филиппов М.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Импактные струи широко используются в энергетике, авиационной технике, химической промышленности, электронике и т.д. Охлаждение (нагрев) протяженных поверхностей предполагает использование многосопловых систем. Важную роль в этом случае начинает играть процесс взаимодействия между струями. Смещение параллельных струй с одним и тем же числом Рейнольдса изучено достаточно основательно [1-3], чего нельзя сказать о струях с отличающимися расходами [4]. В то же время следует отметить растущую необходимость таких исследований для различных технических приложений [5].

В данной работе представлены результаты измерений полей давления на импактной поверхности при фиксированном расходе первичной струи и изменяемом расходе вторичной струи. Число Рейнольдса первичной струи равнялось $Re = 11000$, а вторичной варьировался в диапазоне $Re = 2750 \div 11000$. Диаметр трубок равен 10 мм, межсоевое расстояние между ними – 12 мм, толщина стенки трубки – 1 мм. Длина трубок составляла ~50 калибров, поэтому течение на срезе было развитым. Расстояние между соплом и преградой изменялось в диапазоне $h/d = 0,5-10$.

Отбор давления на поверхности осуществлялся через отверстия диаметром 0,8 мм, число отверстий – 31. Измерение давления производилось дифференциальным манометром. Основной массив данных получен для распределений давлений вдоль линии, проходящей через оси трубок; в ряде опытов измерялось все поле вокруг трубок.

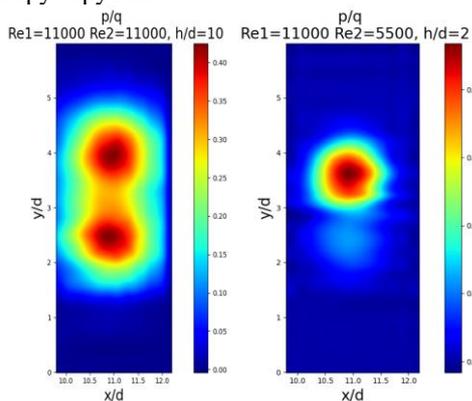


Рис.1. Распределение коэффициента давления по стенке.

Типичное распределение коэффициентов давления на импактной поверхности демонстрируется на Рис. 1. Здесь и далее величина p есть избыточное относительно атмосферы статическое давление, а $q = \rho U_{im}^2/2$ – скоростной напор, определенный по максимальной скорости на срезе сопла главной струи. Если расходы в обеих струях одинаковы (Рис. 1а), то поле давления симметрично и оно напоминает своеобразный диполь с ярко выраженной зоной взаимодействия

между струями. При снижении числа Re вторичной струи вдвое (Рис. 1б) поле давлений более размыто за счет интенсивного смешения двух струй. Как видно, это происходит даже при близком расположении струй с преградой. Это говорит о том, что интенсивные процессы смешения струй наблюдаются в пристенном пограничном слое импактных струй.

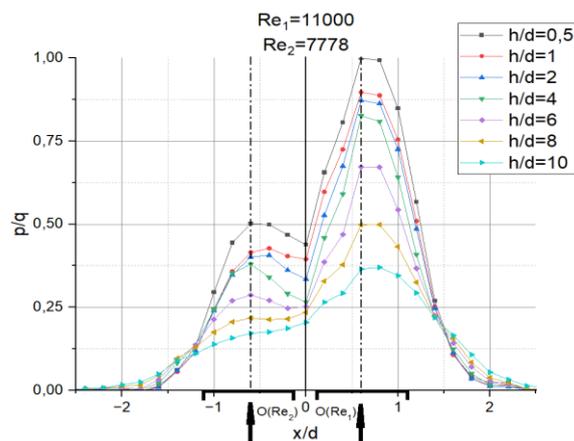


Рис. 2. Коэффициент давления при $Re_1=1100$ и $Re_2 = 7800$.

На рис.2 изображено распределение давления двух струй на поверхности в срединном сечении и при расстояниях от сопла до преграды. Штрихпунктирными линиями выделены оси трубок. При малых расстояниях между соплом и преградой максимумы коэффициентов давления четко просматриваются. По мере удаления от пластины значения максимумов снижаются, а вторичная струя начинает размываться все сильнее. Наконец, при большом удалении $h/d > 6$ максимум вторичной струи полностью размывается, что обусловлено процессом ее «поглощения» более мощной первичной струей.

Список литературы:

1. Терехов В.И., Терехов В.В., Филиппов М.В., Чохар И.А. Взаимодействие двух турбулентных параллельных круглых струй в ближнем поле течения // ПИТФ. 2022. №3, с.3-13.
2. Abdel-Fattah A. Numerical and experimental study of turbulent impinging twin-jet flow // Exp. Thermal and Fluid Science 31. 2007. 1061–1072.
3. Mahir Faris Abdullah M.F., Rozli Zulkifli R., Zambri Harun Z., et al. Experimental and Numerical Simulation of the Heat Transfer Enhancement on the Twin Impingement Jet Mechanism // Energies 2018. 11. 927. doi:10.3390/en11040927
4. Louaifi-Hamaili S, Mataoui A., Aksoh M. Effect of a Weak Jet on a Strong Jet. // J. Appl. Fluid Mech. 2019. V.12, No.6. p.2083-2093.
5. Bunker R.S. Innovative Gas Turbine Cooling Techniques, in Amano R. and Sunden B. (eds.), Thermal Engineering in Power Systems, Wesssex Institute Technology Press. Southampton. GB. 2008.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации
(Соглашение № 075-15-2021-575)

УДК 533.69

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В СУЖАЮЩЕМСЯ ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Сахнов А.Ю., Брызгалов К.В., Наумкин В.С., Лебеда К.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В статье [1] представлены результаты экспериментального исследования течения воздуха в сужающемся плоском канале в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_0 = (1,58 — 4,34) \times 10^4$, рассчитанного через скорость и высоту канала во входном сечении. Исходя из заданного угла наклона верхней стенки канала $\varphi = 2,5^\circ$ и вышеуказанных значений числа Рейнольдса, максимальное значение параметра ускорения $K = \mu/\rho U_x(dU_x/dx) = \text{tg}(\varphi)/Re_0$ составило $(1,0 — 2,76) \times 10^{-6}$. Интенсивность турбулентности на входе в сужающийся канал составляла 2%. Тепловой поток через нижнюю стенку канала был постоянным, и его значение не превышало 1000 Вт/м^2 .

В настоящей работе было проведено численное трёхмерное моделирование условий течения вышеописанного эксперимента при $Re_0 = 1,58 \times 10^4$ (рис.1). Моделирование проводилось в пакете OpenFOAM [2] с применением RANS подхода (решатель $\rho\text{PimpleFoam}$). Для замыкания уравнений Навье-Стокса была использована k- ω SST модель турбулентности [3].

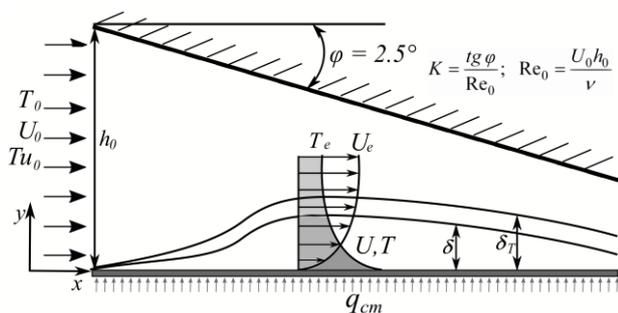


Рис. 1. Схема моделируемого течения.

Поскольку для представленного исследования основной интерес представляет область вблизи нижней теплообменной стенки, то расчётная сетка имела шестикратное сжатие к нижней стенке с количеством ячеек 7 миллионов: $x \times y \times z = 1000 \times 100 \times 70$. Данная сетка выбрана на основе теста на сеточную сходимость, результаты которого представлены на рис. 2. На этом рисунке приведены профили продольной скорости в плоскости симметрии канала xu на расстоянии 0,35 м от входа в канал. Проведённый тест на сеточную сходимость показал, что уменьшение сжатия сетки до трёхкратной величины приводит к заметному расхождению профилей скорости на сетках, тогда как увеличение количества ячеек сетки на 10% по каждой из координат не приводит к заметному изменению профиля скорости. Также на рис. 2 приведены данные эксперимента [1]. Как видно, расчётные профили скорости при шестикратном сжатии сетки к стенке достаточно хорошо описывают полученный в эксперименте

профиль скорости. Исключение составляет внешняя область пограничного слоя, где наблюдается некоторое расхождение с экспериментом. Это расхождение указывает на то, что в эксперименте толщина пограничного слоя больше толщины слоя, полученной в результате численного моделирования. Данное расхождение можно объяснить некоторым отличием условий эксперимента и численного моделирования: в экспериментальной установке «на входе в канал было установлено плавное в вертикальной плоскости входное устройство» [1], тогда как в численном моделировании задавалось постоянное значение скорости по всей входной плоскости канала. Такой «ударный» начальный профиль скорости приводит к появлению незначительного максимума скорости, сохраняющегося на некотором расстоянии от входа в канал. Тем не менее, сравнение с экспериментальными данными по числу Стантона вдоль канала показало, что численная модель даёт хорошее совпадение с экспериментом, начиная с середины длины канала и вплоть до выхода из него.

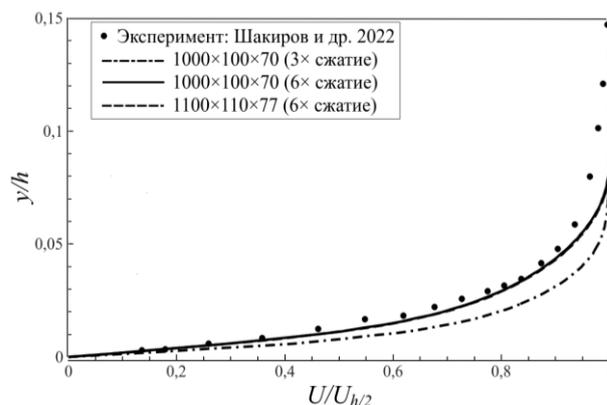


Рис. 2. Верификация модели: профили продольной скорости в плоскости симметрии канала при $x = 0.35 \text{ м}$.

Список литературы:

1. Шакиров Р.Р., Давлетшин И.А., Михеев Н.И. Кинематическая структура течений и теплоотдача в плоских диффузорном и конфузорном каналах // Теплофизика и аэромеханика, 2022. Т.29. № 5. С. 799 — 805.
2. OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox User Guide, 2014. P.212.
3. Menter F.R., Kuntz M., and Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. In Proceedings of the fourth international symposium on turbulence, heat and mass transfer, 2003., Antalya, Turkey, Begell House P. 625–632.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-29-00210,
<https://rscf.ru/project/23-29-00210/>

УДК 532.525.2

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО PIV МЕТОДА ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ПОТОКА ИМПАКТНОЙ СТРУИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ

Строева П.С.^{1,2}, Ничик М.Ю.¹, Дулин В.М.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Затопленные струи – это один из распространенных вариантов турбулентных сдвиговых течений. Их применяют во многих областях промышленности в силу относительной простоты их реализации и высокой эффективности. В настоящее время актуальной задачей является развитие эффективных методов управления гидродинамикой струйных течений для интенсификации турбулентности в сдвиговом слое.

Одним из наиболее известных методов активного контроля струйными течениями является внесение в поток периодических пульсаций расхода жидкости. Внешнее воздействие на поток может привести к усилению или ослаблению когерентных структур, в зависимости от частоты пульсаций расхода. Этот эффект напрямую влияет на изменение интенсивности турбулентных пульсаций. Таким образом, крупномасштабные вихревые структуры в струях играют важную роль в процессе перемешивания [1].

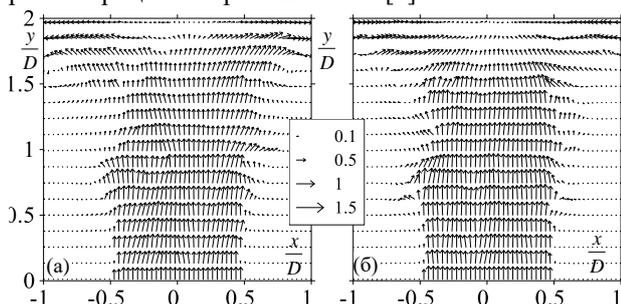


Рис. 1. Векторные поля мгновенной скорости струи:
(а) – возмущение на одной частоте $f = 12.4$ Гц,
(б) – возмущение с модуляцией $f = 12.4$ Гц, $f_m = 6.2$ Гц

Возбуждение струи как один из методов активного контроля струйными потоками достаточно хорошо изучен. Однако, систематическое исследование влияния возмущения на двух частотах (с использованием модуляции) на характеристики импактной струи и теплообмен вблизи импактной поверхности в литературе отсутствует. Амплитудная модуляция осуществляется простым умножением модулирующего сигнала на несущий.

В экспериментах рабочей жидкостью служила дистиллированная вода, число Рейнольдса составляло $Re = 12\,500$. Импактная струя формировалась круглым соплом Витостинского с внутренним диаметром $D = 20$ мм. Расстояние между кромкой сопла и импактной поверхностью составляло $H = 2D$. Пульсации расхода жидкости генерировались на частоте наибольшей восприимчивости струи [2], которая соответствовала числу Струхала $St = 0.5$. Значение пульсационного расхода составляло 10% от общего расхода струи.

В данной работе методом анемометрии по изображениям частиц (particle image velocimetry, PIV) были

получены последовательности реализаций распределений мгновенной скорости струи (рис.1). Для реализации метода PIV был использован измерительный комплекс, состоящий из двойного импульсного Nd:YAG лазера Photonics Industries DM-525-50, высокоскоростной CMOS-камеры Photron Fastcam Nova S12. Частота съемки составляла 3 кГц. Для исследования спектральных характеристик пульсаций скорости, данные были обработаны с применением многокадрового пирамидального корреляционного алгоритма. Пирамидальная корреляция использовалась для повышения точности PIV измерений, а также компенсирует случайные ошибки и ошибки смещения. Дополнительно проводилась обработка периодических пульсаций методом DMD (dynamic mode decomposition) разложения.

Статистический анализ полей скорости показал, что интенсивность турбулентных пульсаций в случае с возбуждением на 35% больше, чем без возбуждения струи, а в случае с двухчастотным возбуждением на 14%. Так же было отмечено разное изменение положения пика интенсивности по оси x для обоих случаев с возбуждением.

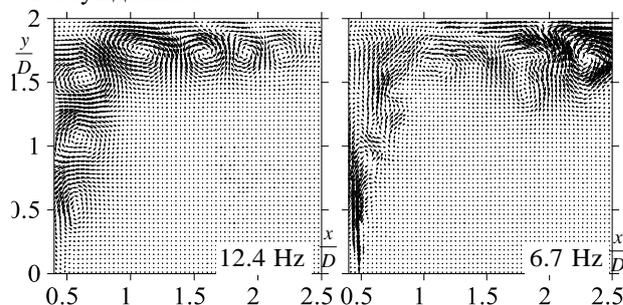


Рис. 2. DMD-моды одночастотного возмущения.

DMD анализ выявил несколько основных мод, которые описывают динамику вихревых структур. Например, слева на рис. 2 DMD-мода ($f = 12.4$) соответствует поведению когерентных вихревых структур в слое смещения, а DMD-мода справа ($f = 6.7$ Гц) – спариванию двух вихрей у поверхности.

Список литературы:

1. Алексеенко С.В., Бильский А.В., Маркович Д.М. Применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа турбулентных потоков с периодической составляющей // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С.145-153.
2. Vejrazka J. et al. Effect of an external excitation on the flow structure in a circular impinging jet // Physics of Fluids. 2005. T.17. №.10. С.105102.

Работа поддержана в рамках государственного задания в Институте теплофизики

УДК 532.5.032

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СКОРОСТЕЙ В МОДЕЛИ ГИДРОТУРБИНЫ ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕ УПРАВЛЯЮЩИХ СТРУЙ

Суслов Д. А.^{1,2}, Скрипкин С. Г.^{1,2}, Литвинов И. В.^{1,2}, Гореликов Е. Ю.^{1,2}, Цой М. А.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Нестационарные вихревые явления, возникающие в закрученном потоке за рабочим колесом гидротурбины, порождают мощные колебания давления, которые неблагоприятно сказываются на надежности и безопасности конструкций гидроэлектростанции. Изучение этих вихревых явлений является трудной задачей как экспериментальными, так и численными методами, поскольку они возникают в трехмерных, турбулентных и нестационарных потоках. Механизмы формирования нестационарных вихревых структур и генерация пульсаций давления всё ещё остаются неясными. Таким образом, расширение режимов устойчивой работы гидротурбин путем управления возникающими вихревыми структурами – актуальная задача гидроэнергетики.

Для управления прецессирующим вихревым ядром (ПВЯ) используется метод, основанный на подаче струи воды через центр тела обтекания рабочего колеса. Но несмотря на эффективность метода в устранении асинхронных пульсаций давления, остаются опасные синхронные пульсации давления с небольшой амплитудой. Кроме того, для подавления ПВЯ необходимо использовать большой расход аксиальной струи, что приводит к потерям эффективности гидротурбины. В литературе почти нет информации о влиянии распределения струи в пространстве и угла ее подачи на эффективность управления вихревыми структурами. Однако, численное моделирование показало [1], что положение аксиальной струи и угол ее подачи значительно влияют на эффективность подавления вихревых структур.

Цель данной работы заключается в изучении влияния возмущения потока управляющей струей на профили скорости, которые реализуются в ближнем и дальнем следе за рабочим колесом воздушной модели гидротурбины.

Для проведения экспериментального исследования был использован аэродинамический стенд с системой из двух последовательно расположенных аксиальных завихрителей. Это позволило выполнить симуляцию распределений скорости, подобных тем, которые возникают в реальных гидротурбинах, и получить необходимое распределение скоростей на выходе с рабочего колеса с высокой точностью.

В ходе работы были сравнены различные способы активного управления, включая подачу управляющей струи воздуха в зависимости от ориентации струи в пространстве, расхода струи и ее распределения относительно площади тела обтекания рабочего колеса.

Подача струи осуществляется путем модификации тела обтекания специальным актуатором, через который подается расход воздуха. Актуаторы позволяют подавать струю радиально, аксиально и сочетать два этих направления. Варьирование режимов работы аэродинамического стенда позволило охватить широкий диапазон работы гидротурбины.

Для количественной оценки эффективности подавления были установлены четыре акустических датчика за рабочим колесом для измерения возникающих пульсаций давления. Два датчика установлены в ближнем следе, два датчика в дальнем следе. Датчики установлены друг напротив друга, с целью получения и последующего анализа разностного сигнала, в котором снижено влияние шумов вне потока. Измерение распределений скоростей и их пульсационных составляющих проведено с помощью лазерного доплеровского анемометра ЛАД-06И.

В ходе экспериментов получено, что при достижении расхода управления в диапазоне 1 – 2% от основного расхода, пульсации давления на частоте ПВЯ значительно уменьшаются. Профили осевой скорости изменяются, подача струи не позволяет развиваться зоне возвратного течения, которая является одним из признаков наличия ПВЯ в потоке. Влияние управляющей струи заметно и в дальнем следе за рабочим колесом, однако там влияние струи на профиль скорости значительно меньше, чем в ближнем следе.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что эффективность подавления вихревых структур зависит от угла направления управляющей струи и ее расхода. Определенные актуаторы могут даже увеличивать амплитуду ПВЯ. Можно отметить, что радиальная подача струи показала перспективу для управления пульсациями давления, требующую дополнительного изучения. Результаты исследования помогут расширить диапазон устойчивой работы гидротурбин и повысить безопасность гидроэлектростанции, а также увеличить ее КПД.

Список литературы:

1. Javadi A., Nilsson H. Active flow control of the vortex rope and pressure pulsations in a swirl generator //Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2017. Т. 11. №. 1. С. 30-41.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта № 21-79-10080

УДК 536.244

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ П-ОБРАЗНЫХ ВИХРЕГЕНЕРАТОРОВ НА ТЕПЛООТДАЧУ ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ

Терехов В.И., Дьяченко А.Ю., Смутьский Я.И., Кульпанович Г.Т.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Отрыв пограничного слоя приводит к увеличению гидравлического сопротивления и понижению теплоотдачи в зоне рециркуляции течения. В последнее время бурное развитие получили работы по поиску форм, размеров и места установки вихрегенераторов, приводящих к разрушению сдвигового слоя после отрыва потока. Влияние вихрегенераторов в форме табов на область присоединения и динамику развития течения изучалось авторами [1]. Измерение структуры течения внутри отрывной области проведено в работе [2], влияние табов, установленных на кромке уступа, на теплоотдачу за ним представлено в статье [3].

Настоящее исследование сосредоточено на опытном изучении влияния на отрыв потока и теплоотдачу за обратным уступом табов П-образной формы.

Эксперименты проводились на аэродинамическом стенде, более подробное описание которого дано в [3]. Стенка за уступом подогревалась постоянным тепловым потоком. Исследования происходили в диапазоне чисел Re_D , вычисленных по гидравлическому диаметру D и средней скорости потока в канале, от 14200 до 42500. На кромке обратного уступа устанавливались табы квадратной формы площадью 6×6 мм² и толщиной 1 мм. Шаг между табами варьировался от 1,2 до 5 калибров (высот уступа). Эксперименты проводились со сплошными и П-образными табами. Площадь живого сечения П-образных табов составляла 44,4% от поперечной площади таба.

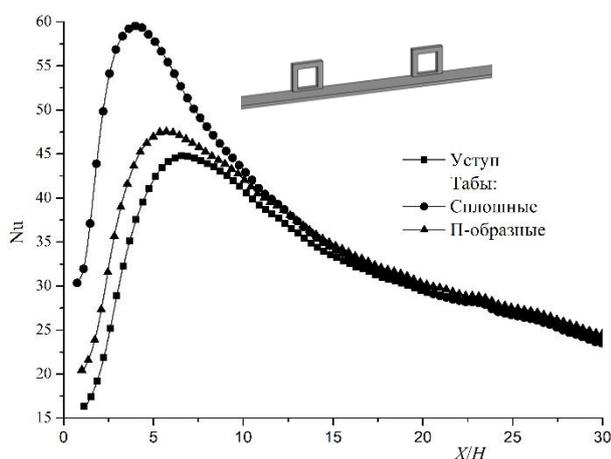


Рис. 1. Профили поперечно осреднённого числа Nu для числа $Re_D = 42500$. Шаг табов – 2,5 калибра.

Табы, установленные на кромке уступа, генерируют пару продольных вихрей, которые делают линию присоединения извилистой, при этом в зависимости от шага установленных табов поперечно осреднённая линия присоединения может приближаться либо отдаляться от линии присоединения при обтекании гладкого уступа. Авторы [1] показали, что эта линия в промежутке между табами приближается к

уступу, а в следе за табами – отдаляется. В работе [3] показано, что в продольном направлении между сплошными табами теплообмен интенсифицируется, а непосредственно за табами подавляется.

Для табов П-образной формы, установленных на кромке обратного уступа с шагом 2,5 калибра, уровень теплообмена занимает промежуточное значение между гладким уступом и сплошными табами (рис. 1). Такое же положение сохраняется и для продольного распределения коэффициентов давления C_p на поверхности за уступом (рис. 2). Установка сплошных табов сокращает расстояние от уступа до максимума теплоотдачи почти на 39 % от гладкого уступа, максимальное число Nu становится больше на треть. Табы П-образной формы оказывают меньшее влияние на теплоотдачу и гидравлическое сопротивление по сравнению со сплошными.

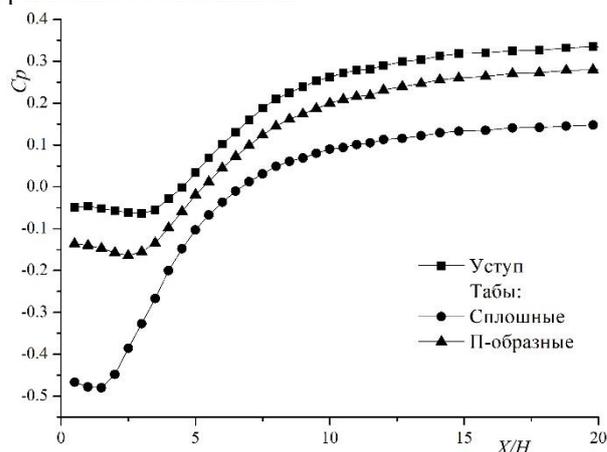


Рис. 2. Профили C_p для числа $Re_D = 42500$.

В докладе рассмотрено влияние шага установленных на кромке обратного уступа сплошных и П-образных табов на локальную и осреднённую теплоотдачу, распределение статического давления за внезапным расширением, а также гидравлическое сопротивление, параметр аналогии Рейнольдса и теплогидравлическая эффективность.

Список литературы:

1. Park H., Jeon W.P., Choi H., Yoo J.Y. Mixing enhancement behind a backward-facing step using tabs // *Physics of Fluids*. 2007. V. 19. № 10. P. 105103.
2. Terekhov V.I., Sharov K.A., Smulsky Y.J., Dyachenko, A.Y. The influence of tabs on fluid dynamic measurements downstream of a backward-facing step // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020 V.1382. №1. P.012047
3. Terekhov V.I., Dyachenko A.Y., Smulsky Y.J., Sunden B. Intensification of heat transfer behind the backward-facing step using tabs // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022. V.35. P.101475.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-19-00162)

УДК 536.244

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТСОЕДИНЕННОГО РЕБРА ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ НА ДИНАМИКУ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООТДАЧУ

Терехов В.И., Дьяченко А.Ю., Смутьский Я.И., Шаров К.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

При турбулентном течении в канале с внезапным расширением возникает отрыв, который увеличивает гидравлическое сопротивление канала и уменьшает теплоотдачу в зоне рециркуляции потока. Для борьбы с такими негативными последствиями используются различные вихрегенераторы. В работе [1] исследуется влияние отклоняющих лопаток на теплодинамические характеристики за обратным уступом. Данная работа является продолжением этого исследования, в которой экспериментально изучено влияние отсоединённого ребра на структуру отрывного течения и теплоотдачу.

Схема течения показана на рис. 1. Эксперименты проводились в канале прямоугольного сечения $20 \times 150 \times 1000$ мм с обратным уступом на расстоянии 600 мм от входа (более подробно см. [1]). В качестве отклоняющего поток элемента было плоское ребро, которое располагалось перпендикулярно потоку. Высота ребра \square составляла 3 мм, а его толщина – 1 мм. В исследовании варьировалась высота щели dh между стенкой и ребром от 0,7 до 1,3 калибра (высот уступа) и расстояние от уступа до ребра t от 0,2 до 3,2. Числа Рейнольдса Re_D потока, вычисленные по гидравлическому диаметру и средней скорости, изменялись в диапазоне 14000 – 42000.

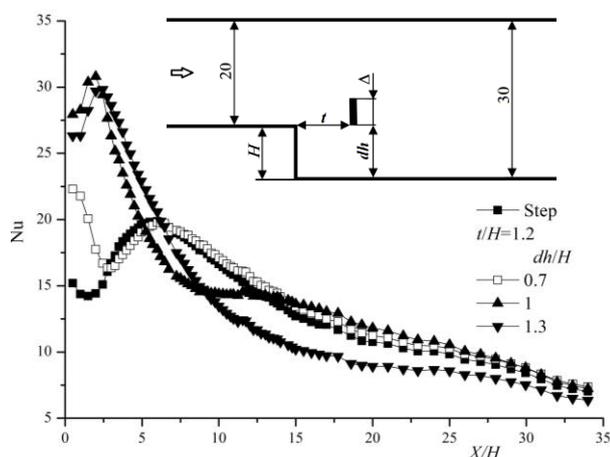


Рис. 1. Профили локального числа Nu для $Re_D=14\ 000$

Результаты измерения теплоотдачи при фиксированном расстоянии между ребром и кромкой уступа $t=1,2H$ при вариации ширины зазора dh представлены на рис. 1. Если ребро располагается ниже кромки уступа ($dh = 0,7$), то его влияние незначительно и оно наблюдается лишь непосредственно у основания уступа. Расположение ребра выше кромки уступа ($dh \geq 1$) приводит к разрушению застойной зоны и значительному росту теплообмена (более чем в 2 раза) в области за ступенькой. При этом максимум теплоотдачи достигается гораздо раньше, чем это наблюда-

ется в случае без ребра. Такое распределение свидетельствует о том, что часть области смешения, отклоненная ребром, попадает на нижнюю стенку вблизи уступа и это влияние распространяется на 3 калибра, в тоже время присоединение основного потока немного смещается по сравнению с обтеканием ступеньки без ребра.

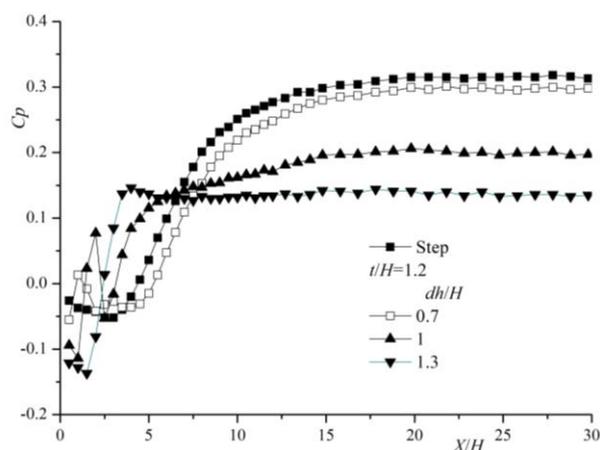


Рис. 2. Профили C_p для числа $Re_D=14\ 000$

Распределение коэффициента давления на стенке канала за точкой отрыва потока, показанное на рис.2, в целом подтверждает сделанные выводы. При обтекании уступа без ребра наибольшее разрежение достигается на расстоянии 2-х калибров от уступа, а его восстановление происходит на 20 калибрах. При установке ребра на высоте $dh=0,7H$ ниже уступа на расстоянии $1,2H$ происходит повышение давления на расстоянии $1H$. Это повышение давления связано с отклонением части оторвавшегося пограничного слоя к стенке возле уступа, в результате чего перед ребром создается своя рециркуляционная область. Восстановление давления также происходит примерно на 20 калибрах и картина в целом сходна с течением без вихреобразующего ребра. По мере увеличения высоты зазора dh уровень разрежения возрастает и уменьшается значение восстановления давления C_p . Это может быть вызвано интенсивным разрушением крупномасштабных вихрей в слое смешения оторвавшегося потока.

В докладе будет представлена картина течения при наличии отсоединенного ребра за уступом, полученная методом PIV, оценены гидравлические сопротивления и теплогидравлическая эффективность.

Список литературы:

1. Terekhov V. I., Dyachenko A. Y., Smutsky Y. I. Heat and mass transfer behind a backward-facing step in the presence of detached vortex generators//AIP Conf. Proc. 2020. V.2211. №.1. P.080001.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 21-19-00162)

УДК 532.5

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ СКОРОСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ. ЭКСПЕРИМЕНТ И ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Яворский Н.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В работе [1] предложена 2 параметрическая модель турбулентного течения в круглой гладкой трубе, описывающая универсальный профиль скорости с экспериментальной точностью для всех чисел Рейнольдса $Re > 20000$. Эта модель заметно лучше описывает экспериментальные данные, чем недавно опубликованная 5 параметрическая модель Cantwell [2]. Причём эти два параметра имеют ясный физический смысл: первый параметр соответствует числу Кармана для пристенной турбулентности, а второй является безразмерным характерным расстоянием от стенки трубы, на котором существенна перемежаемость. Для описания турбулентного течения использовались две модели фрактальной перемежаемости пристенной турбулентности: экспоненциальная и дробно-линейная. Обе они прекрасно описывают известные эксперименты, проведённые в супер-трубе в Принстоне [3] при помощи трубки Пито-Прандтля. Этой же экспериментальной группой были проведены эксперименты, выполненные при помощи термоанемометра [4]. Различие экспериментальных данных, проведённых разными измерительными средствами, подробно обсуждается в работе [5], в которой указывается на весьма существенную неопределённость данных при определении числа Кармана.

В настоящей работе при помощи разработанной нами выше указанной модели турбулентного течения определены две универсальные постоянные 2 параметрической модели для измерений термоанемометром, и они показали заметное отличие от значений этих величин, при которых модель хорошо описывает эксперименты [3]. Кроме этого, недавно были опубликованы результаты прямого численного моделирования турбулентного течения в круглой трубе при высоких числах Рейнольдса [6,7]. Обработка результатов прямого численного моделирования показала, что ситуация схожа с той, что мы имеем при различных способах измерения. Все измерения и расчёты показывают, что универсальный профиль средней скорости в круглой трубе для больших чисел Рейнольдса существует, однако параметры модели заметно отличаются. Это означает, турбулентность в экспериментах и расчётах разная. Если в экспериментах экспериментальные методы вносят существенные изменения в поток вблизи стенки, то при использовании прямого численного моделирования достоверность расчётов вблизи стенки сильно снижается.

В работе предлагается простейшая фрактальная модель перемежаемости, построенная при помощи

минимальных геометрических средств. Фрактальная размерность такой поверхности оказывается $D = \frac{\ln 6}{\ln 2} = \log_2 6$. Вероятность пересечения вихрей этой поверхности вблизи стенки $P \propto y^{2(D-2)}$, где y – расстояние до стенки трубы. Исходя из этой асимптотики можно предложить формулы для перемежаемости $\xi(r, a, R_\tau)$. Здесь r, R_τ – безразмерный радиус трубы и число Рейнольдса стенки. Величина a является характерным расстоянием от стенки трубы, на котором перемежаемость существенна. Дли пути смещения предлагается наипростейшая формула

$$L(r, a, l, R_\tau) = \xi(r, a, R_\tau)l(1 + r^2)(1 - r^2)$$

где l – величина длины пути смещения в центре трубы. Константа Кармана в этом случае вычисляется как $\kappa = 4l$. В результате имеем только два параметра модели a, l . Определяя их из условия минимального среднеквадратичного отклонения получаемых профилей средней скорости от экспериментальных данных, опубликованных в интернете группой экспериментаторов из Принстона [4,5], находим для модели с экспоненциальной перемежаемостью $\kappa=0.442, a=23.1$, а для дробно-линейной модели перемежаемости $\kappa=0.442, a=18.5$. При помощи формул на основе подхода работы [2] получаем семейство профилей средней скорости.

Список литературы:

1. Яворский Н.И. Об универсальном профиле скорости турбулентного течения в круглой трубе // Тезисы докладов «XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике», 21-25 августа 2023, Санкт-Петербург, в печати.
2. Cantwell B.J. A universal velocity profile for smooth wall pipe flow // J. Fluid Mech. 2019. V. 878. P. 834–874.
3. Zagarola M.V., Smits A.J. Mean-flow scaling of turbulent pipe flow // J. Fluid Mech. 1998. V. 373. P. 33–79.
4. Hultmark M., Vallikivi M., Bailey S.C.C., Smits A.J. Logarithmic scaling of turbulence in smooth-and rough-wall pipe flow. // J. Fluid Mech. 2013. V. 728. P. 376–395.
5. Bailey S.C.C., Vallikivi M., Hultmark M., Smits A.J. Estimation the value of von Karman's constant in turbulent pipe flow // J. Fluid Mech. 2014. V. 749. P. 79–98.
6. Pirozzoli S., Romero J., Fatica M., Verzicco R., Orlandi P. One-point statistics for turbulent pipe flow up to $Re_\tau \approx 6000$ // J. Fluid Mech. 2021. V. 926. A28.
7. Yao J., Rezaeiravesh S., Schlatter P., Hussain F. Direct numerical simulation of turbulent pipe flow up to $Re_\tau \approx 5200$ // J. Fluid Mech. 2023. V. 956. A18.

*Работа выполнена при поддержке РФФ,
проект 22-19-00587*

УДК 532.627.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ОДИНОЧНОЙ ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКОЙ

Ян Лун Н., Терехов В.И., Чохар И.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Современная техника нуждается в интенсивном охлаждении, поэтому поиск новых пассивных методов интенсификации теплообмена с помощью различных вихрегенераторов проводится во всем мире. К таковым относятся лунки, табы, ребра, компланарные каналы и некоторые другие. Траншейные (овальные) лунки в этом являются перспективными и у них, согласно численным экспериментам [1], наблюдается опережающий рост теплопередачи в сравнении с гидравлическими потерями.

Экспериментальных исследований теплообмена одиночной траншейной лунки до настоящего времени не проводилось. На первом этапе комплексного исследования структуры течения и теплообмена мы получили поле давления, как на самой поверхности лунки, так и ее окрестности [2]. Следующий шаг – измерение профилей продольной скорости в лунке, а также за ней и после нее [3].

В работе представлены результаты опытного исследования распределения числа Нуссельта в траншейной лунке и ее окрестностях. На одной из стенок плоского канала размерами 20*150*800 мм располагалась одиночная траншейная лунка, которая в поперечном сечении представляла собой цилиндрический сегмент с полусферическими закруглениями на концах (Рис. 1). Глубина лунки были равна 3,3 мм, ширина 15 мм и длина 105 мм. Угол наклона лунки к продольной оси составлял 45°.

Опыты проводились в режиме $q_w = \text{const}$. Температура поверхности измерялась тепловизором фирмы Testo. Число Рейнольдса, вычисленное по гидравлическому диаметру канала, варьировалось в диапазоне $Re=1,9 \cdot 10^4$ до $Re=8,3 \cdot 10^4$.

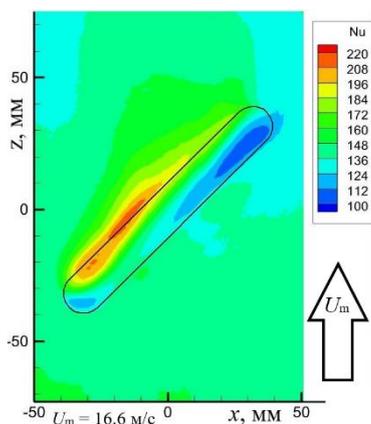


Рис. 1. Поле числа Nu в канале с траншейной лункой

На рис.1 изображено распределение числа Нуссельта при обтекании траншейной лунки. Следует отметить сильную неравномерность распределения теплоотдачи по размаху траншеи. Наиболее интенсивный теплообмен наблюдается на периферии траншеи, где

происходит втекание воздушного потока в траншею. На противоположной стороне траншеи, наоборот, теплообмен снижается. Это обусловлено особенностями формирования течения в траншее [3].

Поле числа Nu неравномерно также и в поперечном направлении. Максимум теплоотдачи достигается на задней кромке траншеи, минимум – непосредственно в каверне сразу после отрыва потока. Более детально это можно проследить на рис. 2, где показано поведение относительного значения числа Nu/Nu_0 , где Nu_0 – теплообмен в гладком канале. Как видно, результаты измерений автомодельны по числу Рейнольдса. В передней части траншеи теплообмен снижается по сравнению с гладким каналом до значений $Nu/Nu_0 = 0,8 \dots 0,85$.

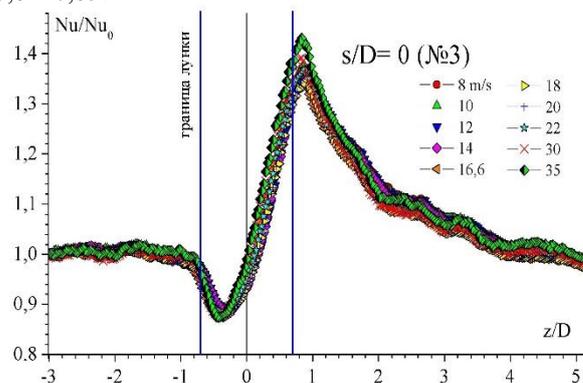


Рис.2. Профили Nu/Nu_0 в срединном сечении канала ($x=0$)

Во второй по потоку части траншеи теплоотдача начинает возрастать и к задней кромке она достигает максимума $Nu/Nu_0 = 1,4 \dots 1,6$. Там же происходит присоединение пограничного слоя. Область релаксации течения с повышенным теплообменом составляет примерно 5 калибров по ширине траншеи и ее размер также слабо зависит от числа Рейнольдса. Подобным образом теплообмен качественно ведет себя и в кавернах полусферической формы [4].

Список литературы:

1. Isaev S.A et al. NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2019, V.145. 118737.
2. Yan Lun N., Baranov I.N., Terekhov V.I., Chokhar I.A. Experimental investigation of pressure fields in a single trench dimple // *J. Physics: Conf. Series*. 2021. Vol. 2119. P. 012033.
3. Терехов В.И., Терехов В.В., Чохар И.А., Ян Лун Н. Экспериментальное исследование структуры течения в одиночной траншейной лунке // *ТИА*, 2022, том 29, № 6. с. 935-947
4. Terekhov V.I., Kalinina S.V., Mshvidobadze Yu.M. A review on heat transfer coefficient and aerodynamic resistance on a surface with a single dimple // *J. Enh. H. Transf.* 2017. V.24. p.411-426.

Работа выполнена при поддержке РФФ
(№ 21-19-00162)

СЕКЦИЯ 4

Гидродинамика, теплообмен и волновые процессы в многофазных средах

УДК 536.24

ВОДОВОЗДУШНОЕ АЭРОЗОЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ РЯДОВ ИЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Абед А.Х.^{1,2}, Щеклеин С.Е.¹, Климова В.А.¹

¹ ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина",
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

² Технологический университет Ирака,
10066, Ирак, Багдад, ул. Аль-Синаа, 906

Теплоотдача в процессе свободной конвекции привлекала внимание многих исследователей не только в области научных изысканий, но и в некоторых инженерных приложениях, таких как пассивные охлаждающие устройства в ядерной энергетике, химии и электронике [1]. На АЭС процесс свободной конвекции нашел применение в системах пассивного отвода тепла (СПОТ). В качестве основных параметров, определяющих эффективность теплоотдачи за счет естественной конвекции, рассматриваются число Рэлея (Ra) и число Прандтля (Pr), которые особенно зависят от температуры нагретой поверхности и температуры окружающей среды. Интенсивность теплорассеяния в процессе естественной конвекции ограничена низкой скоростью потоков и не всегда может соответствовать требованиям условий эксплуатации для стран южных регионов. Использование для отвода тепла взвеси мелких водяных капель (тумана), содержащего единицы процентов водной фазы, позволяет реализовать режимы с высоким тепловым потоком, так как в результате контакта водяной взвеси с нагретой поверхностью и последующего процесса испарения на поверхности теплоотдача существенно возрастает. Использование тумана в охлаждающем воздухе усиливает теплоотдачу, позволяя уменьшить размер и массу устройств для рассеяния тепла.

В данной работе представлены результаты исследования интенсификации теплоотдачи, основанной на процессе испарения тумана. В ходе опытов применялись калориметрические зонды в виде трех рядов. Восемь цилиндрических элементов из меди диаметром $d = 14$ мм с внутренними электронагревателями располагались в вертикальном прямоугольном канале размером 55×117 мм в виде шахматного пучка с расстояниями $S_1 = 30$ мм и $S_2 = 40$ мм. Водовоздушный поток создавался путем смешения воздушного потока и потока аэрозольных капель от генератора аэрозолей с ультразвуковым излучателем частотой $f = 1,7$ МГц. Средний размер капель в соответствии с формулой Ланга составлял $2,7$ мкм.

Исследования производились в двух вариантах:

- при естественном движении сухого воздуха с постоянной температурой 24 °С;
- при интенсификация охлаждения путем введения мелких водяных капель ($d < 10$ мкм).

Верификация методики на сухом воздухе в сравнении с данными работы [2] для многорядных теплообменников показала хорошее соответствие. Результаты интенсификации теплоотдачи для исследованного диапазона влагосодержания в потоке показаны на рис. 1.

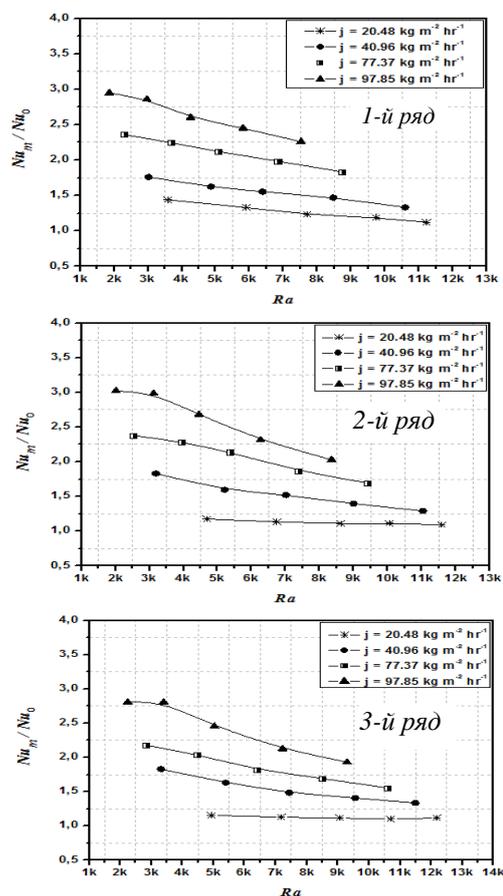


Рис. 1. Коэффициент интенсификации теплоотдачи для разных концентраций воды в тумане j , ($кг/м^2 \cdot ч$)

Результаты эксперимента показали, что теплопередача трубного пучка может быть значительно увеличена за счет присутствия водяного тумана. Число Nu увеличивается примерно на 148%, 144% и 128% соответственно для всех трубных рядов по сравнению с однофазным воздушным потоком при концентрации воды $j = 97,85$ $кг \cdot м^{-2} \cdot ч^{-1}$.

Получена формула интенсификации теплоотдачи Nu_m/Nu_0 , где Nu_m , Nu_0 – число Нуссельта для отвода теплоты туманом и сухим воздухом, соответственно, от безразмерных критериев Рэлея (Ra) и Вебера (We):

$$Nu_m/Nu_0 = 1 + C \cdot Ra^{-0,79} \cdot We^{0,67},$$

где коэффициент $C = 1,95 \cdot 10^7$; $1,91 \cdot 10^7$ и $1,85 \cdot 10^7$ – для первого, второго и третьего ряда пучка трубок.

Список литературы:

1. Тепломассоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках. / Терехов В.И., Пахомов М.А. Новосибирск. НГТУ. 2022. 252 с.
2. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.

УДК 536.423

ДИНАМИКА ПУЛЬСАЦИЙ В КИПЯЩИХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Акашев А.А., Решетников А.В., Скоков В.Н.

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

В связи с быстрым развитием технологий в таких областях, как передачи тепла в микро и макро электронике, в системах охлаждения все более актуальными становятся вопросы энергоэффективности. Исследования показывают значительные преимущества двухфазных систем по сравнению с однофазными в режимах передачи тепла [1]. Однако в процессах кипения в таких системах могут возникать неустойчивые состояния, в которых появляются флуктуации с резким увеличением их спектра мощности в области низких частот ($1/f$ флуктуации) [2, 3]. При этом выбросы в таких процессах могут принимать экстремальный характер и приводить к повреждению или разрушению системы. В такой ситуации чрезвычайно важным является исследование не только причин возникновения такого рода пульсаций, но и выявление и локализация источников генерации $1/f$ флуктуаций.

Проведены опыты по истечению вскипающих жидкостей (воды и этанола) из камеры высокого давления в атмосферу в интервале температур 120 – 180 °С, что соответствовало вскипанию на одиночных не взаимодействующих центрах при низких перегревах жидкостей. В опытах использовался короткий цилиндрический канал диаметром $d=0.5$ мм и длиной $l=0.7$ мм. Обнаружено прецессионное движение струй вскипающих жидкостей при данных термодинамических и геометрических условиях. Измерения локальных и интегральных флуктуаций производилось посредством лазерного излучения в виде точечного луча (локальные флуктуации) и в виде линейной развертки (интегральные флуктуации). Найдено, что спектры мощности флуктуаций изменялись обратно пропорционально частоте на небольших расстояниях от выходного среза канала (см. рис. 1 г). Одновременное измерение интегральных и локальных флуктуаций позволило выявить достаточно высокий уровень корреляции между ними. Эти результаты совпадают и для воды, и для этанола.

Проведено экспериментальное исследование локальных и интегральных пульсационных процессов на платиновом проволочном нагревателе, погруженном в воду и этанол, в условиях пленочного режима кипения методом лазерной фотометрии и резистивным методом соответственно. Зондирование парового конуса около вертикального нагревателя при пленочном режиме кипения показало, что у вершины конуса флуктуации паровой пленки имели спектры с $1/f$ - зависимостью в низкочастотной области. Визуализация пленочного кипения на проволоке посредством скоростной видеосъемки показала, что пленка представляет собой совокупность сухих пятен, над которыми появляется цепочка растущих и всплывающих пузырей. При малом количестве сухих пятен (1-3 штуки) наблюдалась высокая корреляция локальных и инте-

гральных флуктуаций (до 90%). В тоже время измерения флуктуаций в основании парового конуса показали наличие лоренцевских спектров мощности (постоянное значение спектральной плотности в области низких частот) и низкую корреляцию флуктуаций (до 20%).

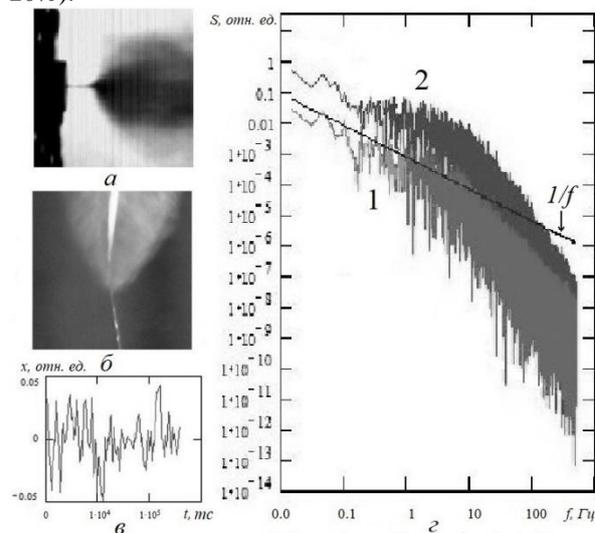


Рис. 1. Струя вскипающей жидкости (а), пленочное кипение на платиновой проволоке (б); пример временной реализации пульсаций (в); характерный спектр мощности (г) локальных (1) и интегральных (2) пульсаций

Выявлена аналогия в поведении пульсационных процессов в струях вскипающих жидкостей и в паровой пленке на вертикальном проволочном нагревателе при кризисном режиме кипения. Сравнение полученных спектров мощности пульсаций в струях, вскипающих воды и этанола, а также в паровой струе при пленочном кипении показывает, что в исследованных системах возникают $1/f$ флуктуации в низкочастотной области. Высокая степень корреляции локальных и интегральных возмущений позволяет выявлять и локализовать возможные источники высокоэнергетических крупномасштабных пульсаций.

Список литературы:

1. Chong Li, Xiande Fang, Qiumin Dai. Two-phase flow boiling instabilities: A review// Annals of Nuclear Energy. 2022. Vol. 173. № 109099. P. 1-23.
2. Koverda, V.P., Skokov, V.N., The origin of $1/f$ fluctuations and scale transformations of time series at nonequilibrium phase transitions, Physica A, 2005, vol. 346, no. 3-4, pp. 203-216.
3. Reshetnikov, A.V., Mazheiko, N.A., Skokov, V.N., and Koverda, V.P., Hydrodynamic response to explosive boiling-up in a jet of superheated water, Int. J. Heat Mass Transf., 2015, vol. 85, pp. 965-970.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-29-00426,
<https://rscf.ru/project/22-29-00426/>

УДК: 519.6:532.5:62-9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛА И ИСПАРЕНИЯ СЫРЬЯ В ПОТОКЕ ГАЗА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА ОСНОВЕ ЭЙЛЕРОВА ПОДХОДА**Аксёнов А.А.¹, Жлуктов С.В.¹, Каширин В.С.¹, Сазонова М.Л.¹,
Черный С.Г.², Зезюлин И.В.², Дроздова Е.А.³, Роде А.А.³**¹ Общество с ограниченной ответственностью «ТЕСИС»,
127083, Россия, Москва, ул. Юннатов, 18² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1³ Общество с ограниченной ответственностью «Омсктехуглерод»,
644024, Россия, Омск, ул. Пушкина, 17/1

Технический углерод (сажа) – востребованный продукт, получаемый термическим разложением (пиролизом) углеводородов (как правило, нефти) в потоке газа-теплоносителя [1]. Технический углерод широко применяется в качестве усиливающего компонента в производстве резин и пластических масс. В производстве шин используется 70% всего выпускаемого углерода. При печном производстве углерода жидкое углеводородное сырье впрыскивается форсунками в поток продуктов сгорания природного газа. Происходит распыл и испарение сырья с дальнейшим пиролизом. Важно, чтобы сырье полностью испарилось до начала пиролиза, иначе будет образовываться кокс, загрязняющий продукт [2]. Для совершенствования технологии производства углерода, в частности, обеспечения полного испарения сырья до начала пиролиза, невозможно обойтись без математического моделирования процессов, протекающих в реакторе. Численное моделирование является важнейшим способом получения наиболее полной и детальной информации об особенностях работы реактора. В связи с этим, в программном комплексе (ПК) FlowVision разработана трехмерная математическая модель и метод расчета распыла и испарения сырья в потоке газ-теплоносителя [3]. Для отработки методики моделирования в качестве сырья выбрана вода. Газ-теплоноситель это – продукты сгорания природного газа. Дробление капель сырья и его испарение в потоке газа-теплоносителя моделируются в рамках Эйлера-Эйлера подхода взаимодействия сплошной (несущей) и дисперсной сред. Сплошной фазой считается газ-теплоноситель, движение которого описывается уравнениями Навье-Стокса, учитывающими турбулентность, теплоперенос и массоперенос. Динамический коэффициент турбулентной вязкости сплошной фазы определяется из модели турбулентности KEFV [4]. Движение дисперсной фазы – распыленного на капли сырья и продуктов его испарения – описывается неоднородным конвективно-диффузионным уравнением для концентрации частиц, учитывающим массоперенос и теплоперенос. Для дробления капель сырья применяется модель WAVE [5]. Базовым соотношением этой модели является эволюционное уравнение для радиуса жидких частиц, содержащее начальный их радиус, минимальный стабильный радиус и характерное время распада жидких частиц. Распад капель происходит при превышении их начального радиуса над минимальным стабильным радиу-

сом. Интегрирование этого уравнения позволяет вычислить результирующий средний диаметр частиц после распада. Режим распыла сырья из форсунки (тип, форма, диаметр капель, концентрация, скорость капель, температура, состав сырья) является входным параметром задачи. В демонстрационном расчете задан цилиндрический распыл. Возможен распыл в виде конуса. Для этого в месте форсунки задается подвижное тело – сфера и определяется на ней нормальная массовая скорость. Радиус сферы и погружение сферы в форсунку позволяют задать угол распыла и радиус форсунки. Можно задавать расход сырья в зависимости от угла распыла сырья из форсунки. Возможны вариации составов, подаваемых в реактор сырья и теплоносителя, а также режимов их подачи. В демонстрационной версии состав подаваемого в реактор газ-теплоносителя определяется продуктами сгорания природного газа: N₂ = 73%; H₂O = 15%; CO₂ = 7%; O₂ = 5%. В расчете участвуют объемные доли сырья, продукта его испарения и газа в расчетной ячейке. Численная модель позволяет определять дисперсный состав распыляемого сырья, степень его испарения. В дальнейшем разработанная модель будет использована при постановке и решении задачи оптимизации дисперсного состава сырья и его испарения путем подбора параметров подаваемых газа и сырья, а также при проектировании оптимальной геометрии реактора. Представлены результаты расчета распыла и испарения сырья в реакторе для производства технического углерода. По найденному в каждый момент времени распределению множества капель распыла сырья в реакторе определяется важный параметр, характеризующий мелкость распыла – средний саутеровский диаметр.

Список литературы

1. Технический углерод: морфология, свойство, производство / Гульмисарян Т.Г., Капустин В.М., Левенберг И.П.; М.: Каучук и Резина, 2017. 586 с.
2. Производство и использование технического углерода для резин / Орлов В.Ю., Комаров А.М., Ляпина Л.А.; Ярославль: Александр Рутман, 2002. 512 с.
3. Аксёнов А.А. FlowVision: Индустриальная вычислительная гидродинамика // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9. № 1. С. 5-20.
4. Жлуктов С.В., Аксёнов А.А., Карасёв П.И. Моделирование байпасного ламинарно-турбулентного перехода в рамках к-ε-подхода // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 6. С. 879–888.
5. Reitz R.D. Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays // Atomization and Spray Technology. 1987. V. 3. P. 309-337.

УДК 532.529.5

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА СТРУКТУРУ ФАКЕЛА РАСПЫЛА ЭЖЕКЦИОННОЙ ФОРСУНКИ

Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторев Н.Н., Перфильева К.Г.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

При распыливании жидкости в различных технических установках широко используются эжекционные форсунки [1]. Эффективность форсунок определяется структурой факела, дисперсностью и пространственным распределением концентрации капель.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния коэффициента поверхностного натяжения жидкости на пространственное распределение концентрации капель в факеле распыла эжекционной форсунки. Для снижения коэффициента поверхностного натяжения применялись поверхностно-активные вещества.

Для исследования влияния поверхностно-активных веществ на структуру факела распыла эжекционной форсункой применялась экспериментальная установка [2], включающая распыливающее устройство, системы подачи жидкости и газа, а также систему оптической диагностики (рис. 1). В качестве распыливающего устройства применялась эжекционная форсунка. Система подачи жидкости включает мерную емкость с рабочей жидкостью и трубопровод. Система подачи газа состоит из компрессора, батареи баллонов и трубопровода. Для измерения расхода газа применялся ротаметр, для контроля давления – манометры. Система оптической диагностики состоит из двух соосно установленных выпуклых линз, зондирующего лазера, фотоприемника и осциллографа с электронным усилителем.

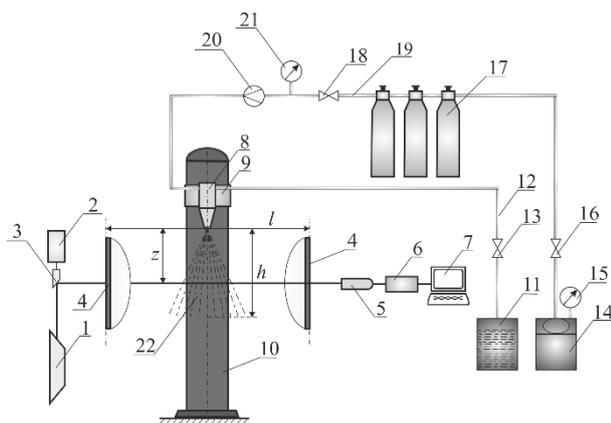


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – зондирующий лазер; 2 – электродвигатель; 3 – угловой отражатель; 4 – линзы; 5 – приемное устройство; 6 – осциллограф; 7 – компьютер; 8 – исследуемая форсунка; 9 – подвижная каретка; 10 – штанга; 11 – резервуар с рабочей жидкостью; 12 – силиконовая трубка; 13, 16, 18 – запорные вентили; 14 – компрессор; 15, 21 – манометры; 17 – батарея баллонов; 19 – гибкий шланг; 20 – ротаметр; 21 – факел распыла.

Расстояние от среза сопла форсунки до измерительного объема составляло $z = 10$ см. В качестве зондирующего лазера использовали лазер газовый

ЛГН-118-3В с длиной волны $\lambda=0.6328$ мкм и мощностью $W = 10.5$ мВт. В качестве фотоприемника применялся фотодиод ФДК-155 в фотогальваническом режиме.

В ходе эксперимента предварительно подготавливали растворы поверхностно-активных веществ (додецилсульфата натрия и синтанола АЛМ-10) в дистиллированной воде с заданной концентрацией, что обеспечивало снижение коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Для исследования структуры факела распыла эжекционной форсунки применялся метод спектральной прозрачности. Метод основан на измерении спектрального коэффициента пропускания при лазерном сканировании по хордам факела распыла форсунки в заданном сечении. По экспериментально измеренным значениям проводилось решение соответствующей обратной задачи (уравнения Абеля) [3].

На рис. 2 приведены радиальные распределения массовой концентрации капель в факеле распыла эжекционной форсунки с тангенсальной подачей газа при распыливании «чистой» дистиллированной воды, растворов дистиллированная вода-додецилсульфат натрия и дистиллированная вода-синтанол АЛМ-10.

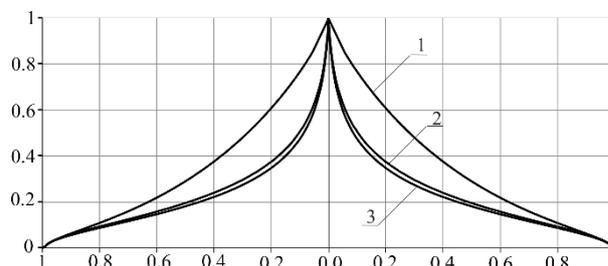


Рис. 2. Радиальные распределения массовой концентрации капель в факеле распыла эжекционной форсунки: 1 – «чистая» дистиллированная вода; 2 – раствор дистиллированная вода-додецилсульфат натрия; 3 – раствор дистиллированная вода-синтанол АЛМ-10.

Список литературы:

1. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984. 256 с.
2. Патент РФ 2633648, МПК G01N 15/02, G01N 21/53. Устройство для определения пространственного распределения концентрации капель в факеле распыла форсунки / Архипов В.А., Трофимов В.Ф., Басалаев С.А., Антонникова А.А. Заявлено 18.05.2016. Опубл. 16.10.2017. Бюл. № 29. 18 с.
3. В.А. Архипов, С.С. Бондарчук. Оптические методы диагностики гетерогенной плазмы продуктов сгорания. Томск: ТГУ, 2012. 265 с.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-79-00092,
<https://rscf.ru/project/22-79-00092/>

УДК 532.529.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ МОНОДИСПЕРСНОГО КЛАСТЕРА КАПЕЛЬ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОСХОДЯЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУХА

Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторев Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

В природе и в различных технических приложениях многие процессы включают генерацию и эволюцию облака жидко-капельного аэрозоля при его гравитационном осаждении. В качестве примеров можно привести образование атмосферных осадков из грозовых облаков, распространение токсичных компонентов при отделении отработанных ступеней жидкостных ракет-носителей [1], аварийный сброс авиационного топлива [2], процессы при реализации авиационных технологий тушения пожаров [3].

При осаждении жидко-капельного аэрозольного облака в поле силы тяжести происходит его эволюция, в процессе которой изменяются форма облака, скорость движения центра масс, концентрация, форма, размеры капель и другие параметры. Изменение характеристик аэрозольного облака происходит за счет процессов динамического взаимодействия капель с несущей средой, коагуляции и дробления капель при взаимных столкновениях.

В настоящей работе представлены результаты исследования динамики формирования и осаждения монодисперсного кластера капель при воздействии восходящего потока воздуха. Для экспериментального исследования разработана оригинальная установка [4]. Для определения скорости осаждения центра масс кластера капель под действием силы тяжести при неподвижной внешней среде и при подаче обдувающего внешнего потока использовалась видеосъемка высокоскоростными камерами, расположенные на разных высотах по траектории движения кластера. Изменение конфигурации кластера капель также фиксировалось видеокамерами. Для проведения видеосъемки разработана и отлажена специально созданная система подсветки объекта и экранирующих поверхностей, обеспечивающих получение контрастных видеок кадров кластера (см. рис.1).



Рис. 1. Фотография монодисперсного кластера из 60 капель диаметром 2.1 мм.

Получены новые результаты экспериментального исследования процесса гравитационного осаждения кластера монодисперсных капель дистиллированной воды в воздушной среде в следующих диапазонах параметров: диаметр капель в кластере $d=(1.6\div 2.2)$ мм; скорость внешнего восходящего воздушного потока $u=(0.5\div 1.2)$ м/с; количество капель в кластере $N=(37\div 60)$; объемная концентрация капель $C_v=(0.0056\div 0.024)$.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

– В отсутствие обдувающего потока по мере уменьшения начальной объемной концентрации капель в кластере от 0.024 до 0.0056 скорость осаждения центра масс кластера уменьшается от 3.8 до 2.1 м/с.

– При увеличении скорости восходящего потока воздуха $u_{об}$ скорость осаждения монодисперсного кластера u монотонно уменьшается (таблица).

Таблица. Зависимость скорости гравитационного осаждения кластера капель от скорости восходящего потока воздуха.

$u_{об}, \text{ м/с}$	0	0.5	1.2
$u, \text{ м/с}$	3.8	3.2	2.9

– При увеличении скорости внешнего восходящего воздушного потока отмечается увеличение скорости расширения кластера капель в горизонтальной плоскости при его гравитационном осаждении.

Список литературы:

1. Архипов В.А., Жарова И.К., Козлов Е.А., Ткаченко А.С. Прогнозирование экологических последствий распространения облака токсичных аэрозолей в районах падения отработанных ступеней ракет-носителей // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, №1. С. 89–93.
2. Arkhipov V.A., Kozlov E.A., Titov S.S., Tkachenko A.S., Usanina A.S. Zharova I.K. Evolution of a liquid-drop aerosol cloud in the atmosphere // Arabian Journal of Geosciences. 2016. V. 9, No. 2. Paper 114.
3. Асовский В.П. Особенности тушения лесных пожаров вертолетами с использованием подвесных водосливных устройств // Научный вестник МГТУ ГА: Аэромеханика и прочность. 2009. № 138. С. 142-149.
4. Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторев Н.Н., Поленчук С.Н., Романдин В.И., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Способ получения компактного кластера монодисперсных капель заданного размера. Заявка на патент РФ № 2022129777 от 17.11.2022г

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00307, <https://rscf.ru/project/22-19-00307/>

УДК 536.423.1

МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ МОНОДИСПЕРСНОГО КЛАСТЕРА КАПЕЛЬ

Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Закономерности испарения капель необходимы при решении ряда прикладных задач – проектирование энергетических устройств, движение частиц в плазменном потоке, оптимизация технологий тушения пожаров и др. [1, 2]. В большинстве практических приложений (в частности, при анализе эффективности тушения пожаров тонкораспыленным хладагентом) реализуется процесс осаждения кластера капель. При этом наблюдается эффект взаимодействия соседних капель как на скорость осаждения, так и на интенсивность испарения всего кластера.

Для учета влияния этого эффекта необходимы экспериментальные данные по осаждению и испарению кластера монодисперсных капель в зависимости от основных параметров жидкости и внешнего воздействия (поток воздуха, температура окружающей среды и т.д.). При проведении экспериментальных исследований испарения кластера капель возникает сложность в технической реализации формирования компактного кластера капель. Капли, входящие в кластер, должны быть расположены на минимальном расстоянии друг от друга и при этом необходимо не допустить их коагуляцию.

В настоящем сообщении рассматривается новый метод экспериментального исследования скорости испарения монодисперсного кластера капель [3].

На рисунке приведена схема устройства для исследования скорости испарения кластера капель 15. С помощью импульсной подачи жидкости из подающего сосуда через набор капилляров 5 одинакового диаметра происходит образование кластера капель, равномерно расположенных друг от друга. Для создания высокотемпературной среды используется полый цилиндрический нагреватель, выполненный из керамической трубы 1, на внутренней поверхности которой установлены нихромовые спирали 2, соединенные с источником напряжения 3. Длина керамической трубы выбрана такой, чтобы капли не успели полностью испариться при прохождении зоны нагрева. Мерная емкость 4 с набором капилляров одинакового диаметра располагается над верхним срезом керамической трубы. Размер капель на входе в нагреватель измеряется с помощью видеосъемки 10. Суммарные массы капель, поступивших в нагреватель и в приемную емкость 11 за время проведения измерений, определяют взвешиванием жидкости в мерной и приемной емкостях.

Разработанный способ позволяет получить идентичные устойчиво висющие капли на концах капилляров; обеспечить стабильный одновременный отрыв капель от капилляров; исключить слияние (коагуляцию) исходных капель, формируемых на концах капилляров. Использование керамической трубы с нагревательным элементом позволяет создать высокотемпературную зону с заданной температурой.

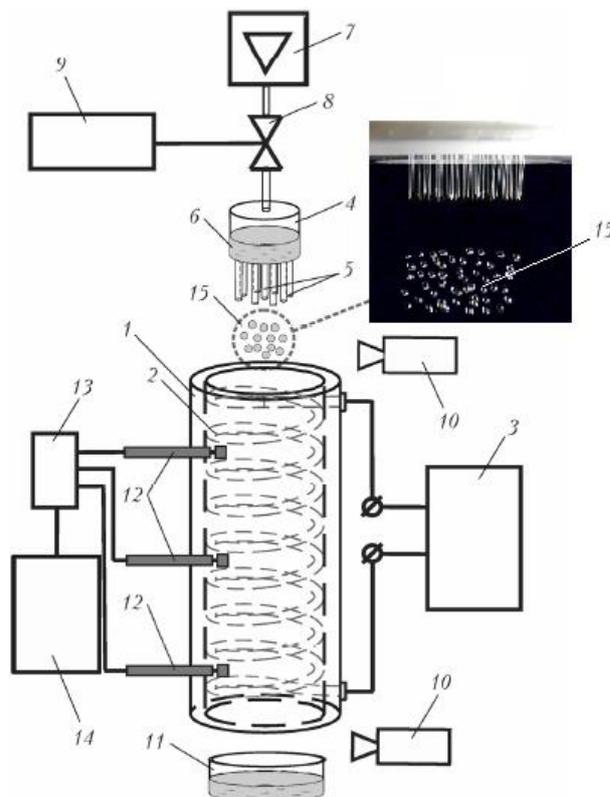


Рис. 1. Схема установки для измерения скорости испарения кластера капель: 1 – керамическая труба, 2 – нихромовые спирали, 3 – источник напряжения, 4 – мерная емкость, 5 – капилляры, 6 – исследуемая жидкость, 7 – воздушный микро компрессор, 8 – электроинжектор, 9 – низкочастотный генератор напряжения, 10 – система визуализации, 11 – приемная емкость, 12 – терморезисторы, 13 – усилитель, 14 – осциллограф, 15 – кластер капель

С помощью нового способа получены экспериментальные данные по скорости испарения монодисперсного кластера $n \leq 60$ капель дистиллированной воды в воздухе.

Список литературы:

1. Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 282 с.
2. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 302 с.
3. Заявка на патент № 2022129777 Способ получения компактного кластера монодисперсных капель заданного размера / Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Полечук С.Н., Романдин В.И., Усанина А.С. Заявл. 17.11.2022.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-19-00307
(<https://rscf.ru/project/22-19-00307>)

УДК 532.613.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДЫ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВСПЛЫТИЯ КЛАСТЕРА МОНОДИСПЕРСНЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Архипов В.А., Усанина А.С., Чуркин Р.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Динамика всплытия пузырьков в зависимости от физико-химических параметров дисперсной фазы и дисперсионной среды является актуальной задачей в механике гетерогенных сред. Для изменения гидродинамического режима всплытия (скорости, коэффициента сопротивления) пузырькового течения во внешнюю среду вводится поверхностно-активное вещество [1-3].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния природы поверхностно-активного вещества на динамику всплытия кластера пузырьков в области чисел Рейнольдса $Re < 1$.

Экспериментальная установка состоит из прозрачного сосуда, наполненного жидкостью, устройства для подачи пузырьков и системы визуализации процесса. В качестве жидкости использовался глицерин и полиметилсилоксановая жидкость. Эксперименты проведены для трех типов поверхностно-активного вещества: анионного, неионогенного и фторированного. Экспериментальные исследования выполнены для следующих пар жидкость–поверхностно-активное вещество: глицерин–лаурилсульфат натрия, глицерин–диламид, полиметилсилоксановая жидкость–фторированное поверхностно-активное вещество.

Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований процесса всплытия кластера монодисперсных пузырьков в присутствии поверхностно-активного вещества показал, что общая картина всплытия пузырькового кластера одинакова для всех используемых в работе поверхностно-активных веществ и включает три стадии (рис. 1): стадию движения сферы, стадию формирования и движения сфероида, стадию распада сфероида. Длительность каждой из стадий зависит от начальной объемной концентрации кластера пузырьков.

Экспериментальная зависимость коэффициента сопротивления кластера монодисперсных пузырьков от числа Рейнольдса $Re = \rho_l u D / \mu_l$ рассчитывалась по формуле

$$C_D = \frac{4gD(\rho_l - \rho)}{3\rho_l u^2},$$

где g – ускорение свободного падения; D – диаметр пузырьков, составляющих кластер; ρ_l – плотность жидкости; ρ – плотность воздуха; u – скорость всплытия центра масс пузырькового кластера.

Экспериментально показано, что величина коэффициента сопротивления кластера монодисперсных пузырьков не зависит от типа поверхностно-активного вещества. По-видимому, это объясняется тем, что в вязкой жидкости практически отсутствуют сольватные оболочки.

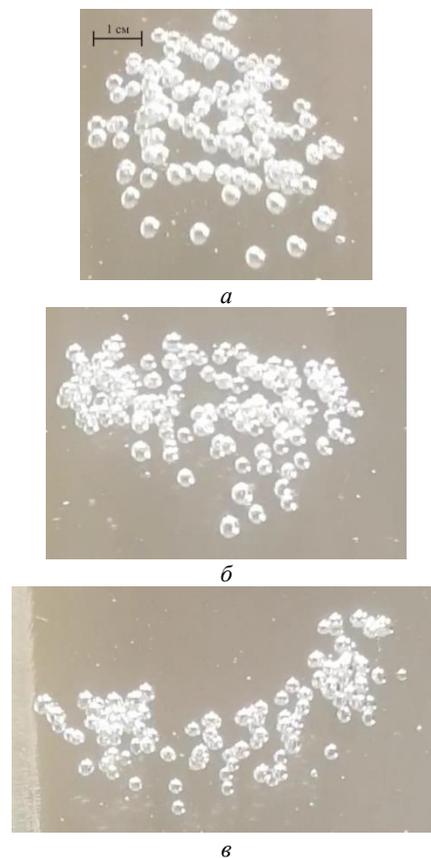


Рис. 1. Фотографии всплытия пузырькового кластера в растворе глицерин-диламид: а – стадия движения сферы; б – стадия формирования и движения сфероида; в – стадия распада сфероида

Экспериментально выявлено качественное и количественное совпадение динамики всплытия кластера монодисперсных пузырьков в присутствии поверхностно-активного вещества при контактном и бесконтактном режиме всплытия.

Список литературы:

1. Трушин А.М., Дмитриев Е.А., Акимов В.В. Механика образования микропузырьков при диспергировании через поры микрофильтрационных мембран // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45. № 1. С. 28-34.
2. Донцов В.Е. Процессы растворения и гидратообразования за ударной волной в жидкости с пузырьками из смеси азота и углекислого газа при наличии поверхностно-активного вещества // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. № 1. С. 89-101.
3. Takemura F. Adsorption of surfactant onto the surface of a spherical rising bubble and its effect on the terminal velocity of the bubble // Physics of Fluids. 2005. Vol. 17. 048104.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-79-10028,
<https://rscf.ru/project/22-79-10028/>*

УДК 532.5

СОУДАРЕНИЕ НАПОЛНЕННОЙ ЧАСТИЦАМИ МИКРОГЕЛЯ КАПЛИ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО БИОПОЛИМЕРА С НАНОВОЛОКНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ЧИСЛА ВЕБЕРА

Ашихмин А.Е., Пискунов М.В., Федоров В.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Технология трехмерной печати биологических тканей включает процесс взаимодействия биочернил с печатной поверхностью биомедицинского скаффолда. Процесс биопечати заключается в нанесении наполненных клетками биоматериалов, также называемых биочернилами, на печатный стол в соответствии с компьютерной моделью, которая имитирует структуру естественной живой ткани. На сегодняшний день, одним из наиболее перспективных методов биопечати является метод капельной биопечати, так как он предлагает печать с самым высоким разрешением, т.е. этим методом можно точнее наносить биочернила на печатный стол. В свою очередь, биочернила могут представлять сложные полимерные жидкости, например, такие как гидрогели. Исследование особенностей динамики поведения капель биочернил в процессе печати биологических тканей является актуальным вопросом [1]. Более того, соударение со стенкой капель жидкостей с дисперсной фазой представляют практический интерес для многих современных практических технологий, так как применение таких жидкостей позволяет усовершенствовать ключевые характеристики рабочих процессов [1]. Наличие дисперсной фазы осложняет анализ результатов и вносит особенности в известные процессы, характерные для соударения капли с поверхностью. Кроме того, для исследования эмульсий на основе термочувствительного полимера необходимо поддерживать заданные температурные условия как жидкости, так и поверхности соударения, что является ещё одним фактором, осложняющим исследования. Большое внимание уделяется вопросам влияния структуры и смачиваемости поверхности взаимодействия на исследуемые процессы. Однако, до сих пор неизученным остается влияние внутренней неоднородности жидкости (внутренней структуры и компонентного состава) на взаимодействие капли такой жидкости с поверхностью при соударении. Учет фактора поверхности еще больше усложняет задачу.

Основные действующие на процесс соударения силы оцениваются с помощью безразмерных критериев, таких как числа Рейнольдса (Re) и Вебера (We). В исследовании число We варьируется от 50 до 500.

Для исследования взаимодействия капли с поверхностью используется экспериментальный стенд [2], включающий высокоскоростную видеокамеру, прожектор, систему позиционирования сопла и подложку для поверхности взаимодействия. Для поддержания температуры жидкости используется магнитная мешалка с нагревом и термостатируемая ячейка. Основным методом исследований является теневая высокоскоростная видеорегистрация под небольшим углом относительно вертикальной оси падения капель и сбоку под углом 90° относительно этой оси.

В качестве исследуемой жидкости используется эмульсия на основе раствора агара с биополимерными частицами из раствора альгината натрия. Концентрация биополимерных частиц в эмульсии составляет 20% масс. Средний размер частиц составляет 300 мкм.

Выбор данных компонентов эмульсии обуславливается биосовместимостью веществ. Агар является растительным заменителем желатина. Полностью растворим в воде при температурах от 95°C . При охлаждении до комнатной температуры становится чистым и крепким гелем, который является термообратимым (при нагреве до температур $85-95^\circ\text{C}$ становится жидким раствором). Альгинат натрия $((\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6\text{Na})_n)$ является натуральным природным полисахаридом, получаемым из морских водорослей. Используется в качестве пищевой добавки как загуститель и стабилизатор. В качестве поверхности взаимодействия использовались две нановолокнистые поверхности (прототипы медицинских скаффолдов) с различной смачиваемостью. Статический контактный угол, измеренный при нанесении капель исследуемой жидкости, составил $127,3^\circ$ и $48,9^\circ$.

Измерены реологические и поверхностно-активные свойства полимерной эмульсии. Выполнено экспериментальное исследование взаимодействия капель полимерной эмульсии со скаффолдами. Зарегистрирована динамика изменения диаметра внутренней деформации капли, которая при низких We носит характер осцилляций и обретает квазисторическую форму с характерным углублением, диаметра внешней деформации капли относительно диаметра ее растекания, диаметра контактного пятна капли в фазах растекания и стекания, диаметра максимального растекания и минимального стекания. Качественно и количественно оценена деформация обода капли полимерной эмульсии в условиях варьирования We . Установлены отличия режимов взаимодействия капель полимерной эмульсии, соударяющихся с двумя разными по смачиваемости скаффолдами, с учетом варьирования We . Продемонстрированы морфологические особенности растекания и стекания капель полимерных эмульсий с частицами микрогеля.

Список литературы:

1. Blanken N., Saleem M.S., Thoraval M.J., Antonini C., Impact of compound drops: a perspective, *Curr. Opin. // Colloid Interface Sci.* 2021. V.51. P.101389.
2. Piskunov M., Khomutov N., Semyonova A., Ashikhmin A., Misyura S. Unsteady convective flow of a preheated water-in-oil emulsion droplet impinging on a heated wall. // *Phys. Fl.* 2022. V.34. 93311.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-29-20109,
<https://rscf.ru/project/22-29-20109/>
и средств Администрации Томской области*

УДК 621.1.016:532.66:532.62

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦЕВОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ С ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Барткус Г.В., Кузнецов В.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

При расслоенном и кольцевом режимах газожидкостного течения образуются волны на межфазной поверхности различной частоты и амплитуды, имеющие значительное влияние на межфазное трение и массообмен [1]. Определение волновых характеристик течения необходимо для решения задач теплообмена и требует детального изучения.

Характеристики межфазных волн определяются такими параметрами, как скорость потока, давление, геометрия канала, а также физическими свойствами жидкостной и газовой фаз. Основные виды волн на границе раздела в газожидкостном потоке подразделяются на волны ряби, волны возмущения и большие волны [2]. Волны ряби имеют крутой фронт волны, малое отношение амплитуды волны к ее длине и малое время жизни [3]. Волны возмущения [4] характеризуются большей скоростью, чем волны ряби, и большим интервалом между волнами.

В работе [5] получены характеристики волн возмущений на поверхности менисков жидкости для смеси этанол-азот. Эксперименты проведены в прямоугольном микроканале 190×380 мкм для расслоенного и кольцевого режимов течения. Определена толщина остаточного слоя жидкости и амплитуда волн. Получено, что увеличение Re_{gas} газа вызывает уменьшение остаточного слоя жидкости и амплитуды волн. Значение безразмерной средней амплитуды волн $\langle A \rangle / W$ изменялось в диапазоне 0.03-0.32; для разных Re_{liq} и одинаковых Re_{gas} $\langle A \rangle / W$ имело близкие значения. Средняя амплитуда волн могла превышать в 3 раза значение среднего остаточного слоя для рассмотренных расходов жидкости и газа. Получено, что при увеличении приведенной скорости газа больше жидкости вытеснялось из области мениска в пленку жидкости и переход от расслоенного режима течения к кольцевому происходил при потере устойчивости мениска жидкости для $Re_{gas}=825-1350$.

В данной работе проведено экспериментальное исследование характеристик волн возмущения, образующихся на поверхности менисков жидкости в углах прямоугольного микроканала при расслоенном и кольцевом режимах течения для спутного газожидкостного течения азот-вязкая жидкость ПМС (полиметилсилоксан). Азот подавался в прямой микроканал, выполненный из PDMS, расположенный горизонтально, а жидкость поступала через боковой смеситель перпендикулярно основному потоку газа.

На рис. 1 приведена высокоскоростная визуализация кольцевого режима течения в начале канала для приведенных скоростей жидкости и газа $J_{liq} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м/с, $J_{gas} = 48,9$ м/с, направление течения показано стрелкой. Как видно, наблюдаются волны

возмущения на мениске жидкости на короткой стороне микроканала в нижней части кадра. Волны на мениске в верхней части кадра имеют меньшую амплитуду из-за неравномерного распределения жидкости по периметру канала в начале. При увеличении приведенной скорости газа и далее по длине канала распределение жидкости становится равномерным.

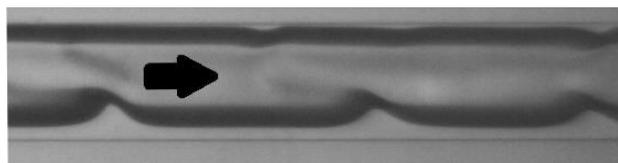


Рис. 1. Высокоскоростная визуализация кольцевого режима течения при $J_{liq}=1.5 \cdot 10^{-3}$ м/с, $J_{gas}=48.9$ м/с для смеси азот-ПМС, направление течения показано стрелкой.

С помощью высокоскоростной визуализации были получены области существования кольцевого и расслоенного режимов течения и произведена обработка полученных данных. Установлены зависимости толщины слоя жидкости и амплитуды волн на поверхности мениска от приведенных скоростей газа и жидкости. Получено, что при увеличении приведенной скорости газа возрастало количество жидкости, вытесняемой из области мениска в пленку жидкости на широкой стороне микроканала. Проведено сравнение с данными, полученными ранее для жидкости-этанол.

Полученные результаты о волновых характеристиках течения необходимы для решения задач теплообмена в микроканалах, так как волны на межфазной поверхности определяют величину поперечных потоков жидкости и интенсификацию межфазного теплообмена.

Список литературы:

1. Annular two-phase flow / Hewitt G. Elsevier, 2013. 327 с.
2. Azzopardi B. J. Drops in annular two-phase flow // International Journal of Multiphase Flow. 1997. Т. 23. №.7. С. 1-53.
3. Asali J. C., Hanratty T. J. Ripples generated on a liquid film at high gas velocities // International journal of multiphase flow. 1993. Т. 19. №.2. С. 229-243.
4. Vasques J., Cherdantsev A., Cherdantsev M., Isaenkov S., Hann D. Comparison of disturbance wave parameters with flow orientation in vertical annular gas-liquid flows in a small pipe // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. Т. 97. С. 484-501.
5. Барткус Г. В., Кузнецов В. В. Исследование волновых характеристик кольцевого газожидкостного течения в прямоугольном микроканале // Сборник трудов конференции СТС-39. 2022. С. 14-17.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (121031800215-4)

УДК 004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Борейшо А.С.^{1,2}, Джгамадзе Г.Т.¹, Моисеев А.А.², Савин А.В.^{1,2}, Смирнов П.Г.²

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова,
190005, Россия, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1

² Акционерное общество «Лазерные системы»,
198515, Россия, Санкт-Петербург, пос. Стрельна, ул. Связи, 28, корп. 2, стр. 1

Селективное лазерное сплавление (СЛС) представляет собой передовую технологию по производству металлических изделий сложной геометрической формы, в том числе метаструктуры [1]. Физические процессы, возникающие при взаимодействии лазерного излучения с металлическим порошком, протекают в широких временных и пространственных масштабах. Поэтому моделирование этих процессов с целью углубления теоретических знаний и создания инструмента контроля качества выращиваемого изделия принято разбивать на уровни. В литературе нет общепринятого подхода по структуре многоуровневого моделирования, взаимодействию между уровнями и выполняемыми задачами. Предлагаемая структура приведена в работе [2, 3]. Здесь рассматривается микроуровневая модель.

Масштаб моделирования на микроуровне соответствует масштабу ванны плавления, где возникают такие процессы, как теплопередача (кондуктивная, конвективная, лучистая), фазовые переходы (твердое тело-жидкость, жидкость-газ), конвекция жидкого расплава, управляемая различными силами (тяжести, плавучести, поверхностного натяжения, Марангони, давление отдачи), а также вылет частиц.

Рассматриваемые процессы могут быть описаны задачей о движении потока, управляемой лазерным излучением. Поэтому в основе математической модели микроуровня лежит система уравнений гидродинамики сплошной среды с переменными свойствами, для описания которой применяется подход VOF (Volume of Fluid). Порошок задается как жидкость с нулевой скоростью движения и со свойствами металла в твердом состоянии. Это позволяет использовать единую систему уравнений для всех фаз. Поскольку при фазовом переходе происходит скачкообразное изменение энергии, а дифференциальные уравнения оперируют непрерывными функциями, вводится конечная толщина границы раздела фаз. Для описания траектории движения вылетевших частиц используется подход DPM (Discrete phase model), что в свою очередь позволяет уменьшить вычислительные затраты и требования к сетке. Подробное описание модели микроуровня приведено в работах [4]. Принятые допущения аналогичны моделям, приведенным в литературе.

Численные примеры с описанием протекающих физических процессов приведены в работах [3, 4].

Изучено влияние сил на динамику ванны расплава (рис. 1). В центре лазерного пятна в виду высокой плотности энергии может происходить испарение материала, которое способствует возникновению давления отдачи. Оно и оказывает наибольшее влияние (случай б). Происходит быстрое охлаждение поверх-

ности, возникающий температурный градиент способствует развитию эффекта Марангони, под действием которого расплавленный металл вытекает из области воздействия вперед и назад. В центре пятна происходит углубление ванны расплава. По мере удаления от центра в сторону противоположную движению лазерного пятна происходит выравнивание между силой Марангони и давлением отдачи (случай 5). Поскольку температура ванны опускается ниже температуры кипения, то влияние давления отдачи прекращается и основной вклад вносит сила Марангони (случай 4). По мере движения к началу прохода начинают влиять другие силы, такие как поверхностное натяжение (случай 3), тяжести (случай 2), плавучести (случай 1). Силой плавучести можно пренебречь.

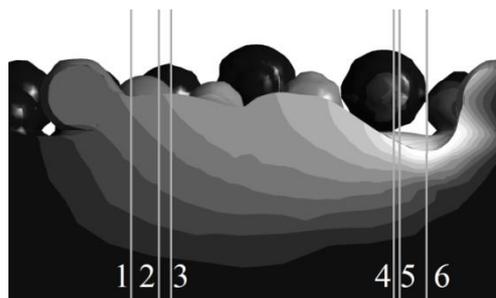


Рис. 1 Поле температуры вблизи ванны расплава

В работе описана эффективная вычислительная модель гидродинамической и теплофизической картины лазерного плавления металлических порошков, учитывающая объёмные и поверхностные эффекты, в том числе образование мелкодисперсной пыли. Приведены примеры численных расчётов.

Список литературы:

1. Борейшо А.С., Джгамадзе Г.Т., Моисеев А.А., Савин А.В., Смирнов П.Г., Смоленцев С.С., Филатов А.А. Управление конвективным и лучистым теплообменом в пористых метаматериалах и на метаповерхностях, полученных методом селективного лазерного сплавления // ИФЖ. 2021. Т. 94, №6. С. 1545.
2. Борейшо А.С., Джгамадзе Г.Т., Моисеев А.А., Савин А.В., Смирнов П.Г., Смоленцев С.С., Третьяк П.С. Микроуровневое моделирование теплофизического рабочего процесса селективного лазерного сплавления // В сборнике: Аддитивные технологии: настоящее и будущее. сборник докладов VI международной конференции. Москва. 2020. С. 148-155.
3. Борейшо А.С., Джгамадзе Г.Т., Моисеев А.А., Савин А.В., Смирнов П.Г. Многоуровневое моделирование рабочих процессов селективного лазерного сплавления // Фотоника. 2022. №3
4. Борейшо А.С., Джгамадзе Г.Т., Зыбина В.В., Моисеев А.А., Савин А.В., Смирнов П.Г., Смоленцев С.С., Третьяк П.Г. Микроуровневое моделирование теплофизических и гидродинамических процессов селективного лазерного сплавления. ТВТ. 2022. Т. 60. № 1. С. 108-114.

УДК 544.032.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ С ТЕКСТУРИРОВАННОЙ НАНОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРОМ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Васильев М.М.^{1,2}, Шухов Ю.Г.¹, Терехов В.В.^{1,2}, Старинский С.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Контролируемое изменение свойств смачиваемости различных поверхностей привлекает все большее внимание ввиду перспективности в таких задачах как улучшение антикоррозийных и самоочищающихся свойств, интенсификации теплообмена и т.д. [1-4]. На сегодняшний день повышение эффективности теплопереноса особенно важно для сферы электроники, где идет интенсивный рост мощностей устройств одновременно с их миниатюризацией. Известно, что свойства смачивания поверхности задаются химическим составом материала, а также микро- и наноструктурой. Одним из подходов, способных тонко контролировать оба этих параметра, является импульсная лазерная абляция (ИЛА). К преимуществам ИЛА относятся вариативность выбора обрабатываемого материала, гибкость в подборе параметров обработки и возможность создания паттерны произвольной геометрии с высоким пространственным разрешением [5].

В данной работе произведено комплексное исследование динамики взаимодействия падающих капель воды с медными поверхностями, модифицированных наносекундным лазером. Изготовление медных образцов происходила при помощи Nd:YAG лазера ($\lambda = 1064$ нм). В ходе работы проведено текстурирование меди для исследования динамики смачивания каплями воды поверхности. Сразу после лазерной обработки материал проявляет гидрофильные или супергидрофильные свойства смачивания. Однако по мере хранения модифицированных образцов, имеющих гидрофильные/супергидрофильные свойства, при комнатных условиях наблюдается гидрофобизация вплоть до супергидрофобных состояний. Таким образом, была достигнута возможность изменения свойств смачивания поверхности от супергидрофильных до супергидрофобных.

С целью более детального понимания процессов взаимодействия капли с поверхностью с заданными свойствами смачивания, произведен численный анализ падающих капель на основе метода решеточных уравнений Больцмана. Метод LBM хорошо известен в литературе, как инструмент для описания различных задач физики многофазных течений [6-7]. Численная модель была верифицирована с помощью экспериментальных данных, полученных в рамках данной работы (рис.1). Получены данные о влиянии свойств смачивания поверхности на формирования полей скоростей внутри капли. В итоге была получена верифицированная численная модель, которая позволяет осуществить

точный анализ динамики растекания капель и их свойств в различных условиях.

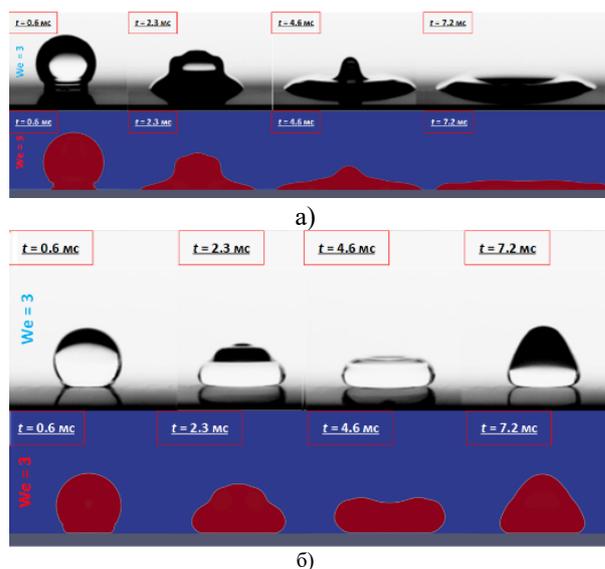


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных данных (сверху) и численных расчетов (снизу) при взаимодействии капли диаметром 2,3 мм с (а) супергидрофильной и (б) супергидрофобной поверхностью.

Список литературы:

1. Vakarelski I.U. et al. Stabilization of Leidenfrost vapour layer by textured superhydrophobic surfaces // Nature. Nature Publishing Group. 2012. V. 489. 7415. P. 274–277.
2. Liang G., Mudawar I. Review of spray cooling – Part I: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux // Int. J. Heat Mass Transf. Elsevier Ltd, 2017. V.115. P.1174–1205.
3. Liu Y. et al. An experimental study of surface wettability effects on dynamic ice accretion process over an UAS propeller model // Aeronaut. Sci. Technol. Elsevier Masson SAS. 2018. V.73. P.164-172.
4. Venkata K.D., Suresh S. Wettability control of copper surface using picosecond laser for enhancing condensation heat transfer // Mater. Sci. Forum. 2020. Vol. 978 MSF, № February. P. 505–513.
5. Starinskiy S.V., Shukhov Y.G., Bulgakov A.V. Laser-induced damage thresholds of gold, silver and their alloys in air and water // Applied Surface Science. 2017. T. 396. C. 1765-1774.
6. Tai Y. et al. Research on the contact time of a bouncing microdroplet with lattice Boltzmann method // Physics of Fluids. 2021. T.33. №.4. C.042011.
7. Li Q., Luo K. H., Li X. J. Lattice Boltzmann modeling of multiphase flows at large density ratio with an improved pseudopotential model // Physical Review E. 2013. T.87. №.5. C.053301.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 19-79-30075

УДК 501

АСИМПТОТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ГЕМОДИНАМИКЕ

Васюткин С.А.^{1,2}, Мержоева Л.Р.², Хе А.К.^{1,2}, Чупахин А.П.^{1,2}, Карпенко А.А.²

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева 15

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, г. Новосибирск, у. Пирогова, 2

Исследование течений вязкой жидкости в каналах сложной геометрии является комплексной задачей фундаментальной гидродинамики и имеет многочисленные приложения как при изучении природных явлений (течения в руслах рек, кровеносных сосудах), так и в технических приложениях (трубопроводы, теплообменники). Кривизна канала оказывает существенное влияние на структуру течения, изменяя его топологию и порождая вихри и вторичные течения. Начиная с основополагающих работ Дина имеется много исследований, посвященных нахождению безразмерных параметров, выражающихся через характеристики системы (давление, скорость, кривизны канала и т.д.). Вместе с тем задачу отыскания таких параметров, управляющих потоком, нельзя считать решенной полностью.

Это объясняется сложностью математических моделей, описывающих течение вязкой жидкости в каналах сложной геометрии. Уравнения Навье-Стокса, записанные в специальных координатах, соответствующих геометрии канала, становятся громоздкими, их численные решения трудно обозримыми. Задачи расчета течений вязкой жидкости в таких каналах типичны при решении задач гемодинамики, поскольку реальные кровеносные сосуды имеют сложную геометрию, особенно при наличии аномалий типа бляшек или аневризм.

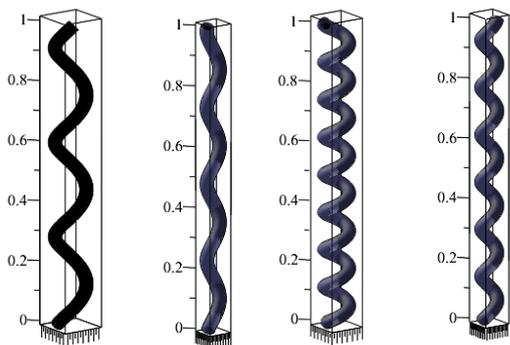


Рис.1. Модели винтовых трубок при вариации кривизны (κ) и кручения (τ): а) $\kappa = 10, \tau = 10$, б) $\kappa = 10, \tau = 20$, в) $\kappa = 20, \tau = 10$, г) $\kappa = 20, \tau = 20$.

В докладе анализируется асимптотическая модель движения вязкой несжимаемой жидкости в извилистом канале [1, 2]. Данная модель получена путем асимптотического представления уравнений Навье –

Стокса в трубе сложной геометрии. Эти уравнения переписываются в специальных координатах, связанных с центральной линией сечения риманового многообразия, задающего геометрию трубы. Модель приближает движение жидкости в изогнутой трубе движением «жидкой линии», которая характеризуется наглядными геометрическими параметрами: кривизной и кручением центральной линии (см. рис. 1). Давление и скорость потока в каждом сечении трубы рассчитываются, как решения задач Пуассона и Стокса (см. Рис. 2). Первый член асимптотического приближения характеризует течение Пуазейля и описывает установившееся течение вязкой жидкости в прямой трубе, второй член приближения явно содержит геометрические характеристики центральной линии трубки – кривизну и кручение. Сумма первого и второго члена приближения имеет порядок сходимости $\varepsilon\sqrt{\varepsilon}$ в L^2 норме относительно малого параметра ε .

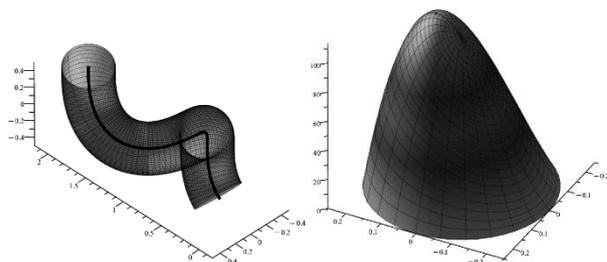


Рис.2. а) модель винтовой трубки с центральной линией; б) профиль скорости.

Такая модель особенно эффективна при расчете интегральных характеристик потока: энергия вязкой диссипации, характеризующая работу по прокачке жидкости в канале сложной геометрии, и специальные медицинские индексы течения. Путем численных экспериментов с применением пакета ANSYS анализируется точность этой модели. Демонстрируются приложения в биомедицине, приводятся 3D расчеты гемодинамики в аорте при наличии аневризмы.

Список литературы:

1. Marusic-Paloka E. The effects of flexion and torsion on a fluid flow through a curved pipe // Appl. Math. Optim. 2001. V.44(3). P.245–272
2. Castineira G., Marusic-Paloka E., Pazanin I., Rodriguez J.M. Rigorous justification of the asymptotic model describing a curved-pipe flow in a time-dependent domain // Z. Fur Angew. Math. Und Mech. 2019. V. 99(1). P. 1–39.

УДК 532.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛА ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СТРУИ**Вожаков И.С., Хребтов М.Ю., Мулляджанов Р.И.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Распыление часто моделируется как двухстадийный процесс. Во время первичного распада жидкость, выходящая из отверстия распылительного сопла, распадается на капли из-за неустойчивости, развивающейся на поверхности жидкости. Неустойчивость может быть вызвана сдвиговым напряжением из-за взаимодействия с окружающей атмосферой (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца) или нормальным напряжением (неустойчивость Рэлея-Тейлора). Сформированные капли претерпевают дальнейшее дробление с образованием еще более мелких капель в результате вторичного распада.

Ранее было выполнено численное моделирование распада закрученной струи в неподвижной атмосфере [1]. Моделирование проведено путем численного решения уравнений Навье-Стокса с использованием кода Basilisk. Отслеживание межфазной поверхности осуществлялось с помощью метода VOF. Для фильтрации мелкомасштабных пульсаций применялся LES метод по модели Vreman [2].

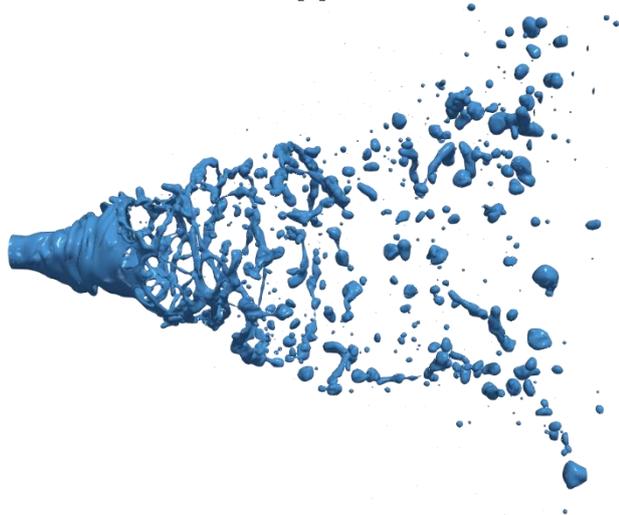


Рисунок 1. Распад закрученной струи.

Показано, что на оси симметрии вблизи сопла, из которого происходит истечение закрученной струи образуется четко выраженная рециркуляционная зона, свободная от жидкости. Выполнено исследование сходимости сетки вплоть до размера ячейки 6 мкм и показано, что распределения капель по размерам являются значительно разными, даже для капель большого размера. Это указывает на то, что масштабы, связанные с границей раздела, являются чрезвычайно требовательными к размерам расчетных ячеек. Другими словами, даже разрешение колмогоровского масштаба не гарантирует абсолютной сходимости по размерам капель из-за эффектов на границе раздела. Эти эффекты особенно заметны в задачах с тонкими слоями жидкости, которые имеют место при истечении закрученных струй.

В настоящей работе выполнено тестовое моделирование распыла двухкомпонентной струи, состоящей из несмешивающихся жидкостей (вода, масло). Для этого была разработана и внедрена в пакет Basilisk модель течения трехжидкостного флюида на основе уравнений Навье-Стокса и метода VOF.

Пространственная дискретизация расчетной области выполняется с использованием кубических ячеек. Сетка адаптивно сгущается с помощью специального алгоритма, который оценивает локальную ошибку аппроксимации градиентов расчетных величин.

Истечение струи осуществляется через отверстие диаметром 0.8 мм в воздушную атмосферу из вихревой форсунки, в которой происходит взаимодействие и закручивание потоков жидкостей (вода, керосин). Однокомпонентные струи истекают из границы области через отверстие диаметром 1.2 мм с фиксированными скоростями 1 м/с.

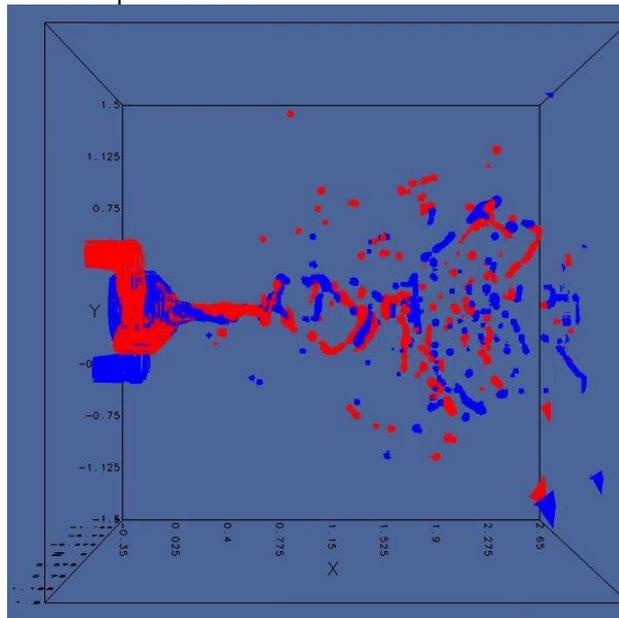


Рисунок 2. Распад двухкомпонентной закрученной струи.

В результате расчета показано, что модель качественно адекватно описывает взаимодействие двух несмешивающихся жидкостей. При этом истечение жидкостей из форсунки происходит в виде закрученных жгутов, которые распадаются во внешней среде.

Список литературы:

1. Vozhakov I. S., Hrebtov M. Y., Yavorsky N. I., Mullyadzhyanov R. I. Numerical Simulations of Swirling Water Jet Atomization: A Mesh Convergence Study // *Water*. 2023. Т. 15. №. 14. С. 2552.
2. Vreman A. W. An eddy-viscosity subgrid-scale model for turbulent shear flow: Algebraic theory and applications // *Physics of fluids*. 2004. Т. 16. №. 10. С. 3670-3681.

Исследование проведено за счет средств гранта РФФ №22-79-10246

УДК 532.517

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ТУРБУЛЕНТНО-ВОЛНОВОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

Гешев П.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

На пленке жидкости, стекающей по наклонной поверхности, с возрастанием расхода появляются большие пространственные волны. При дальнейшем увеличении расхода где-то при числах $Re \approx 200$ в экспериментах наблюдают первые признаки перехода к турбулентному режиму течения [1]. Турбулентность возникает, по-видимому, за передним фронтом волны и затем в ограниченных областях на заднем фронте больших волн становится видимой на свободной поверхности пленки в виде мелкой ряби [1]. Можно ожидать, что из-за малых чисел Рейнольдса турбулентность, вспыхивающая под большими волнами, ослаблена (демпфирована) по сравнению с классической пристенной турбулентностью в плоском канале. Для построения полуэмпирической модели турбулентно-волнового движения жидкости мы используем следующие соображения: 1) Длинноволновое приближение, позволяющее использовать приближения пограничного слоя Прандтля; 2) Идею раздельного описания больших волн и внутренней мелкомасштабной турбулентности, порождающей турбулентную вязкость; 3) Адаптированную модель пристенной турбулентности [2], приводящую вдали от стенки к логарифмическому профилю скорости. Эта модель основана на явной формуле для турбулентной вязкости:

$$v_t = v \frac{y_+^3}{A/D + B y_+^2}, \quad (1)$$

где v - вязкость, $y_+ = v_* y / \nu$, $A = 1015$; $B = 2,5$, $D = 1 - \exp\left[-(y_+ - \delta_0)^2 / \delta_*^2\right]$, $\delta_0 = 10$, $\delta_* = 80$, v_*

- динамическая скорость. Фактор D учитывает демпфирование турбулентного переноса при малых расстояниях y_+ от стенки в области вне вязкого подслоя. В данной работе мы обобщаем результат работы [3] пространственный случай.

Толщина пленки рассчитывается из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_\beta}{\partial x_\beta} = 0. \quad (2)$$

где $q_\beta = \int_0^h u_\beta dy$ вектор расхода жидкости в пленке

($\beta = x, z$). Из условно осредненного уравнения Навье-Стокса (для продольных компонент скорости)

было выведено уравнение для расхода жидкости q_α

$$\frac{\partial q_\alpha}{\partial t} + \nabla_\beta \left(\chi \frac{q_\alpha q_\beta}{h} \right) = -v \frac{q_\alpha}{f_2 h^2} + \frac{f_1}{f_2} \frac{\tau_\alpha}{\rho} +$$

$$+ h \left[\left(g_\alpha + g_y \nabla_\alpha h \right) + \frac{\sigma}{\rho} \nabla_\alpha \nabla_\beta^2 h - \nabla_\alpha \frac{p_g}{\rho} \right] \quad (3)$$

где χ - замыкающая функция от числа Рейнольдса,

τ_α - вектор трения потока газа, p_g - давление, создаваемое потоком газа, σ - поверхностное натяжение,

$g_\alpha = (g_x, g_z)$, g_y - компоненты поля тяжести параллельные и перпендикулярные плоской поверхности,

∇_α - оператор "набла" по x и z . В уравнение (3) входят два безразмерных интеграла, определяемые через турбулентную вязкость

$$f_1 = \int_0^1 \frac{(1-z) dz}{1 + \varphi(\delta_+ z)}; \quad f_2 = \int_0^1 \frac{(1-z)^2 dz}{1 + \varphi(\delta_+ z)}.$$

При выводе уравнения (3) мы использовали для напряжения трения на стенке формулу

$$v \left(\frac{\partial u_\alpha}{\partial y} \right)_{y=0} = v \frac{q_\alpha}{f_2 h^2} + \left(1 - \frac{f_1}{f_2} \right) \frac{\tau_\alpha}{\rho}. \quad (4)$$

Это замыкающее соотношение (4) построено как обобщение формулы для трения на стенке в ламинарном случае, представленной в работах [4, 5].

Выведенная система уравнений описывает пространственное турбулентно-волновое движение пленок жидкости при произвольных числах Рейнольдса. Теплообмен через пленку может быть также включен в эту модель.

Список литературы:

1. Бобылев А.В., Харламов С.М., Гузанов В.В., Квон А.З., Бобылев А.В., Харламов С.М., Гузанов В.В., Квон А.З., Маркович Д.М. Волновая структура пленкожидкости при переходе к турбулентному режиму течения // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. вып. 15. С. 10–13.
2. Гешев П.И. Влияние перемежаемости на толщину и теплообмен турбулентной стекающей пленки жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т.28. № 2. С. 225-238.
3. Гешев П.И. Интегральная модель для турбулентно-волновой пленки жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т.30. №2.
4. Alekseenko S.V., Nakoryakov V.Y. Instability of a liquid film moving under the effect of gravity and gas flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 1995. V.38. P.2127–2134.
5. Jurman L.A., McCready M.J. Study of waves on thin liquid films sheared by turbulent gas flows // Phys. Fluids. A. 1989. V.1. N.3. P. 522–536.

*Исследования выполнены в рамках гос. задания
ИТ СО РАН (№ 121031100246-5)*

УДК 536.2

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА НА ПУЧКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ (ОБЗОР)

Гогонин И.И., Володин О.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Экспериментально было показано, что на каждой трубе горизонтального пучка труб возникает начальный участок теплового пограничного слоя. В зависимости от плотности орошения G [кг/м²с] и полупериметра трубы (πR) начальный участок может играть определяющую роль либо его влиянием можно пренебречь. В докладе представлены результаты экспериментальных исследований вклада различных вариантов доли начального участка на теплообмен при конденсации пара на пучках труб разного диаметра. На основании полученных данных представлен алгоритм расчета конденсатора при конденсации неподвижного пара без неконденсируемых примесей.

На рис. 1 приведены данные по теплообмену на пучках, составленных из труб диаметром от 3 до 45 мм, обработанные в координатах $Nu^* = f(Re)$.

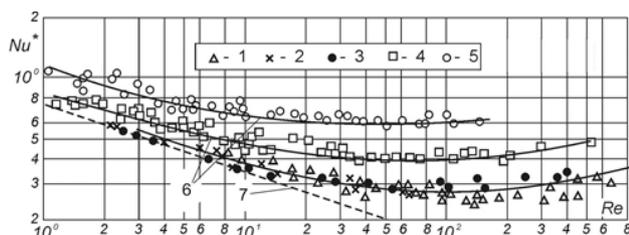


Рис. 1. Теплообмен при конденсации на пакетах из труб разного диаметра [1], хладагент R12: 1 – $D = 45$ мм; 2 – $D = 16$ мм; 3 – $D = 10$ мм; 4 – $D = 6$ мм; 5 – $D = 3$ мм; 6 – линии, осредняющие опыты; 7 – расчет по теории Нуссельта.

Видно, что результаты для пучков из труб $D = 10$, 16 и 45 мм, практически совпадают между собой. Теплообмен на трубах малого диаметра ($D = 3$ и 6 мм) заметно выше, и данные начинают зависеть от диаметра труб. Данное увеличение интенсивности теплоотдачи связано с волнами на нижней образующей труб и с относительно большим вкладом доли начального участка с конвективным теплообменом. Визуальные наблюдения и скоростная видеосъемка показывают, что при больших плотностях орошения точки отрыва стекающих струй периодически перемещаются по периметру труб, а струи раскачиваются.

Конденсация пара на пучках оребренных труб с оптимальным расстоянием между ребрами приводит к многократной интенсификации теплоотдачи. Принципиальным результатом является установленный экспериментально факт слабой зависимости теплообмена от плотности орошения $Nu^* \sim Re^{-0.07}$, здесь Nu^* – число Нуссельта в котором $L = (v^2 / g)^{1/3}$, L – длина поверхности охлаждения, м; v – кинематическая вязкость, м²/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Представленные результаты получены на трубах с коэффициентом оребрения $F_{op} / F \leq 4$, где F – площадь теплообменной поверхности, м².

На рис. 2 представлено сравнение интенсивности теплоотдачи на пучках оребренных и гладких труб. При $\bar{a} = 0,6 - 0,8$ условный коэффициент теплоотдачи на порядок увеличился (здесь \bar{a} – безразмерное межреберное расстояние). При конденсации водяного пара число Nu^* на пучке оребренных труб увеличивается в 2–2,5 раза.

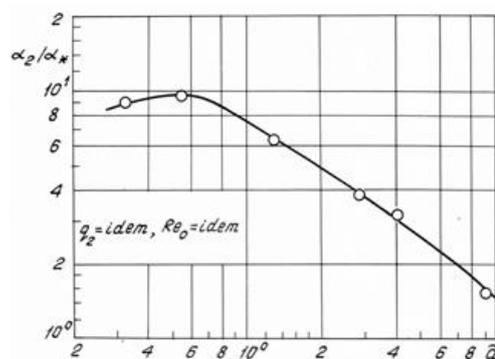


Рис. 2. Сравнение интенсивности теплоотдачи при конденсации пара на пакетах оребренных и гладких труб [2]: R12, $Re = 400$.

Суммарное увеличение коэффициента теплоотдачи складывается из следующих составляющих:

а) Увеличения теплообменной поверхности за счет оребрения;

б) Уменьшения характерного линейного размера ($h \ll D$). Для оребренной трубы характерным размером является высота ребра.

в) Капиллярные силы воздействуют на пленку таким образом, что влияние плотности орошения почти нивелируется.

Предприятиям, выпускающим конденсаторы, необходимо переходить на теплообменники с оптимальными параметрами оребрения, что позволит заметно снизить вес и габариты аппаратов.

Список литературы:

1. Гогонин И.И., Сосунов В.И., Лазарев С.И., Кабов О.А. Исследование теплообмена при конденсации пара на пакетах горизонтальных труб разного диаметра // Теплоэнергетика. 1983. №3. С. 17-19.
2. Gogonin I.I., Kabov O.A. An Experimental Study of R11 and R12 Film Condensation on Horizontal Integral-Fin Tubes// J. of Enhanced Heat Transfer, 1996, V. 3, N. 1, P. 43-53.

УДК 532.582.92

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАЗМЕРА И СКОРОСТИ ПУЗЫРЕЙ ОТ ОДИНОЧНОГО КАПИЛЛЯРА В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ

Гореликова А.Е.^{1,2}, Кашинский О.Н.¹, Чинак А.В.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Изучение газожидкостных течений и динамики газовых пузырей имеет большое значение в различных инженерных и промышленных областях, таких как нефтегазовая, химическая и микробиологическая промышленность. Знание законов и особенностей протекания газов и жидкостей, их взаимодействия и механизмов перемешивания является важной составляющей при проектировании и улучшении технологических процессов и оборудования.

Основная часть экспериментальных работ посвящена движению пузырьков в вертикальных трубах [1, 2]. Значительно меньше внимания уделяется движению пузырей в наклонных каналах [3, 4], несмотря на то, что угол наклона может оказывать значительное влияние на размер и скорость газовых пузырей, а также на распределение газовой фазы по сечению канала.

Данная работа посвящена экспериментальному изучению параметров газовых пузырей от одиночного капилляра в наклонной трубе. Измерения проводились при углах наклона трубы $30 \div 60^\circ$. В выбранном диапазоне углов наклона в работах по исследованию теплообмена в газожидкостных пузырьковых потоках в плоском наклонном канале показано значительное увеличение теплообмена и трения на стенке [5].

Экспериментальная установка представлена на Рис. 1. Газ (воздух) от компрессора через измеритель-регулятор расхода (1) в жидкость через одиночный капилляр с внутренним диаметром $D_c = 0,2$ мм (2). Расход газа определялся с помощью измерителя-регулятора расхода Aalborg GFC17 (верхний предел измерений 10 мл/мин, точность $\pm 0,1$ мл/мин). Рабочим участком служила оптически прозрачная оргстеклянная труба общей длиной 1,2 м и внутренним диаметром $D_t = 32$ мм. Съемка пузырей производилась на системную камеру Nikon Zfc (4) при освещении LED-матрицей (5). В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Расстояние от места ввода газа в жидкость, до точки наблюдения пузырей и получения снимков варьировалось в диапазоне $L = 100 \div 600$ мм. Эксперименты проводились при расходе газа $Q_g = 0,5 \div 3,5$ мл/мин. Для больших значений расхода газа через капилляр значительное влияние на средний размер газовых пузырей оказывает коалесценция пузырей вблизи капилляра и по пути следования вдоль верхней стенки наклонной трубы [6].

Получены новые экспериментальные данные о скорости движения одиночных пузырей в зависимости от размера пузыря и от угла наклона рабочего участка. Получены распределения диаметров газовых пузырей для различных углов наклона канала и различных значений расхода газа, показано влияние угла наклона на отрывной диаметр пузыря.

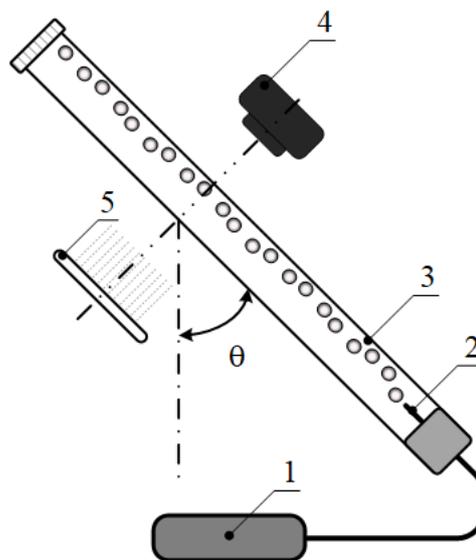


Рис. 1. Схема установки: 1 – измеритель-регулятор расхода газа, 2 – капилляр, 3 – рабочий участок, 4 – камера, 5 – LED-матрица.

Список литературы:

1. Zhou Y., Kang P., Huang Z., Yan P., Sun J., Wang J., Yang Y. Experimental measurement and theoretical analysis on bubble dynamic behaviors in a gas-liquid bubble column // *Chemical Engineering Science*. 2020. V.211. P.115295.
2. Wang G., Zhang M., Dang Z., Ishii M. Axial interfacial area transport and flow structure development in vertical upward bubbly and slug flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. V.169. P.120919.
3. Zenit R., Tsang Y.H., Koch D.L., Sangani A.S. Shear flow of a suspension of bubbles rising in an inclined channel // *J. Fluid Mech.* 2004. V.515. P. 261–292.
4. Donnelly B., Meehan R.O., Nolan K., Murray D.B. The dynamics of sliding air bubbles and the effects on surface heat transfer // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. V.91. P. 532–542.
5. Гореликова А.Е., Кашинский О.Н., Пахомов М.А., Рандин В.В., Терехов В.И., Чинак А.В. Турбулентная структура течения и теплоперенос в наклонном пузырьковом потоке. Экспериментальное и численное исследование. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2017. №1. с.117–129. DOI: 10.7868/S0568528117010066
6. Gorelikova A.E., Randin V.V., Chinak A.V. Effect of the angle of pipe inclination on average size and size distribution of gas bubbles injecting from a capillary to liquid. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2023. 11(1) P.21–30.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-20029 при финансовой поддержке Правительства Новосибирской области, <https://rscf.ru/project/22-21-20029>

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ МЕТОДОМ LOESS ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КАВИТАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ВОДЫ

Гришаев Д.А.

Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

При проведении большого количества экспериментов исследователю важно представить полученные данные в удобной для анализа форме и учитывать влияние погрешностей измерений и разбросы данных. Такая задача стояла и в описываемом исследовании изменения реологических характеристик воды при нарушении сплошности потока и возникновении кавитационных полостей. Удобным для таких целей инструментом является процедура сглаживания.

Одним из инструментов сглаживания является метод LOESS (Local Estimated Scatterplot Smoothing – сглаживание локально оцененной диаграммы рассеивания), предложенный исследователем Уильямом Кливлендом [1]. Алгоритм подробно описан в [2] применительно к социально-экономическому прогнозированию, однако его можно применить и к физическим процессам, например кавитации. Алгоритм использовался для выявления зависимости сдвигающего напряжения от скорости сдвига при различных давлениях разрежения при нарушении сплошности потока.

Целью описываемой работы являлось построение аппроксимирующей поверхности из полученных экспериментальных данных, которые, на первый взгляд, казались слабо связанными между собой.

Эксперимент был выполнен на высокоскоростном миксере, помещённом в вакуумную камеру, для трёх различных типоразмеров крыльчаток. Подробное описание лабораторной установки и метода проведения эксперимента представлено в работе [3]. В результате была получена матрица данных для каждой крыльчатки, содержащая потребляемую мощность миксером (Вт) в зависимости от частоты вращения (об/мин) и разрежения в вакуумной камере (ат). Далее была вычислена скорость сдвига слоя жидкости в зависимости от частоты вращения и геометрических размеров крыльчатки, а также напряжение сдвига в зависимости от потребляемой силы тока и момента двигателя на валу. Полученные данные и результаты их обработки методом LOESS показаны на рис 1.

Построение аппроксимирующей поверхности происходило следующим образом. Необходимо знать количество точек, входящих в массив. Далее было задано сглаживание таким образом, чтобы учитывалась половина экспериментальных точек из выборки. Выбиралась произвольная точка для оценки из данных, определялись соседние точки, попадающие в окно оценки, рассчитывались веса. Большой интервал оценки позволяет получить более гладкую поверхность, однако она может не охватывать все экспериментальные данные, а проходить в середине массива.

Если же исследователю нужно, чтобы поверхность стремилась охватить как можно больше точек, то надо

уменьшать окно оценки, чтобы влияние соседних точек, находящихся на расстоянии от заданной точки для оценки, было сильнее. Однако поверхность будет уже не такой гладкой. Поэтому исследователь сам определяет, как будет выглядеть результирующая поверхность.

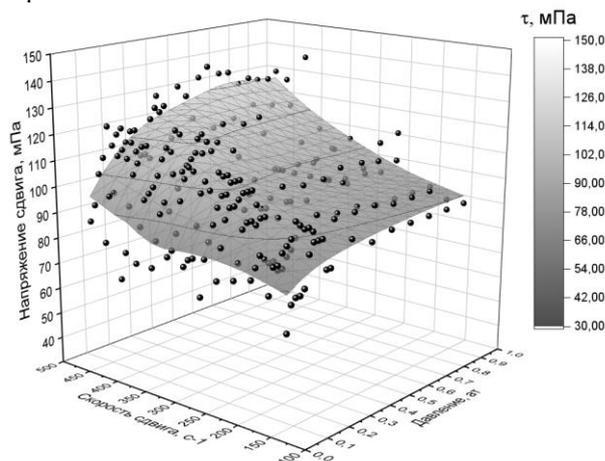


Рис. 1. Аппроксимирующая поверхность, показывающая зависимость сдвигового напряжения от скорости сдвига и давления разрежения.

Таким образом, метод LOESS позволил установить взаимосвязь между тремя физическими величинами, характеризующими кавитационную прочность воды. При увеличении разрежения напряжение сдвига снижается, соответственно необходимо затратить меньше мощности для смещения слоя воды. Точный механизм зависимости сдвигающего напряжения от скорости сдвига при кавитации до сих пор ещё не установлен, так как на возникновение этого явления будут влиять находящиеся в жидкости зародыши (примеси, растворённые газы). Полученные результаты показали возможность определения зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига для двухфазных потоков и применения этих данных для определения кавитационной прочности жидкостей.

Список литературы:

1. Cleveland W.S. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots // Journal of the American Statistical Association. 1979. V.74. Is.368. P.829-836. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10481038>.
2. Светульников И.С. Методы социально-экономического прогнозирования: учебник и практикум для академического бакалавриата. В 2 т. Том 2. Модели и методы / Светульников И.С., Светульников С.Г. М.: Издательство Юрайт, 2017. 447с. Серия: Бакалавр. Академический курс.
3. Радзюк А. Ю., Истягина Е. Б. Экспериментальное определение режима течения при радиальном движении жидкости, Журнал СФУ: Техника и технологии. 2014. № 7 (7). С.48-54.

УДК 544.015

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРИПОЯ В ТРУБКЕ МЕТОДОМ ФАЗОВОГО ПОЛЯ

Груздь С.А., Самсонов Д.С., Кривилев М.Д.

Удмуртский государственный университет,
426034, Россия, Ижевск, ул. Университетская, 1

Одним из способов устранить сколы и пробой обшивки летательных аппаратов является пайка твердым припоем. В ближайшие годы активное развитие аэрокосмической деятельности потребует новых технологий по обслуживанию и устранению повреждений, в том числе и в условиях открытого космоса при микрогравитации. По этой причине исследования процессов смачивания и вязкого течения тонких слоев припоя на различных геометрических поверхностях являются актуальными.

В работе исследуется поведение припоя из сплава Al–10 вес.% Si в трубке круглого сечения из оксида алюминия, внутри которой имеется алюминиевый вкладыш из сплава АМц. Внутренний диаметр трубки 8,7 мм, вкладыша – 7,9 мм. В экспериментальной установке в начальный момент времени припой помещается в вертикально стоящую трубку выше по уровню алюминиевого вкладыша.

Задача рассматривается в неизотермической постановке. Трубка с припоем находится под воздействием контролируемого теплового нагрева со скоростью 5 °С/мин. Нагревается до температуры 900°С, после чего охлаждается с такой же скоростью.

Численное моделирование поставленной нестационарной задачи основывается на решении системы дифференциальных уравнений [1]:

– уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости,

– уравнения Кана-Хилларда для отслеживания перемещения межфазной границы «азот-припой» с учетом конвекции,

– уравнение баланса внутренней энергии.

Заданы граничные условия на стенках трубки. Для уравнения фазовой переменной на стенках трубки величина контактного угла смачивания контролируется уравнением Юнга. Для уравнения сохранения импульса скорость на стенке трубки устанавливается согласно граничным условиям типа Navier Slip, которые устанавливают отсутствие проницаемости через стенку и ненулевую тангенциальную составляющую в тензоре вязких напряжений, что позволяет жидкой фазе скользить по стенке при смачивании поверхности [2]. Для уравнения баланса энергии на стенке трубки заданы граничные условия третьего рода с учетом теплового сопротивления многослойной цилиндрической стенки.

Фазовый переход припоя при плавлении учитывается в функциональной зависимости термодинамических свойств припоя как функции температуры. Скрытая теплота плавления заложена в увеличение удельной теплоемкости при температуре плавления, при

этом интеграл от теплоемкости калиброван на теплоту фазового перехода. Наличие слагаемого градиента поверхностного натяжения в уравнении сохранения импульса обуславливает возникновение переноса вещества из-за эффекта Марангони. При решении задачи используется программный инженерный пакет Comsol Multiphysics, решающий систему уравнений методом конечных элементов.

Представлены результаты по динамике движения припоя по трубке, а также форма, которую он принимает после установления стационарного состояния при различных значениях сил гравитации. Так как в условиях земной гравитации в процесс включаются силы тяжести, то время смачивания трубки и установление стационарного состояния отличается от условий микрогравитации, при которых время установления равновесной конфигурации припоя увеличивается. Полученные расчетные данные позволяют подобрать оптимальные условия и скорости температурного нагрева. Проблема высоких и достаточно длительных перегревов системы «поверхность-припой» может привести к подплавлению основного матричного материала, что нежелательно для процессов пайки.

По результатам моделирования смачивания внутреннего алюминиевого вкладыша при различных значениях величины контактного угла выявлена взаимосвязь между кинетикой движения контактной точки, величиной шероховатости поверхности и контактным углом [3]. Дополнительно обсуждается вопрос реакционного взаимодействия припоя со стенкой, что существенно изменяет кинетику смачивания.

В результатах представлены поля скоростей конвективных потоков внутри трубки для земных условий и условий микрогравитации. Приводится оценка критериальных чисел Пекле и Марангони для анализа процессов, вносящих основной вклад в процессы переноса исследуемой системы.

Список литературы:

1. Gruzd S.A., Krivilyov M.D., Samsonov D.S., Wu Y., Sekulic D.P., Mesarovic S.D. Non-isothermal wetting of an Al alloy pin by Al-Si melt under terrestrial and microgravity conditions // Microgravity Science and Technology. 2022. V. 34(4). P.65.
2. Ding H., Spelt P.D.M. Wetting condition in diffuse interface simulations of contact line motion // Physical Review. 2007. V. 75. 046708.
3. Физико-химические основы смачивания и растекания / Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. М.: «Химия». 1976. 232 с.

Работа выполнена в рамках ЦР «Реал» по заказу ГК Роскосмос и ЦНИИмаш

УДК 536.423:532/52

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ И АКУСТИКИ МНОГОФАЗНЫХ, МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД С ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ

Губайдуллин Д.А.

Институт механики и машиностроения ФИЦ Казанский научный центр РАН,
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

Представлены результаты изучения волновой динамики и акустики многофазных сред с фазовыми переходами. Дается обзор современных публикаций автора и сравнение теоретических и экспериментальных данных, рассмотрены приложения. Проанализированы некоторые особенности и эффекты влияния межфазного теплообмена на распространение волн в парогазожидкостных системах. Ранее ряд аспектов данной проблемы изучены в [1-12].

Изучена динамика акустических возмущений в парогазовых полидисперсных (с произвольной функцией распределения включений по размерам) и дискретных многофракционных капельных и пузырьковых (с оболочкой вокруг пузырька) средах, а также в смесях жидкости с полидисперсными частицами разного сорта и пузырьками газа. Предложены математические модели, получены наиболее общие дисперсионные соотношения, изучены высоко- и низкочастотные асимптотики коэффициента затухания, обсуждаются области применимости развитых теорий. Выведено уравнение радиальных колебаний пузырька, покрытого вязкоупругой оболочкой в вязкоупругой жидкости. Установлено существенное влияние оболочки вокруг пузырька газа на распространение волн в пузырьковых жидкостях. Выявлено хорошее согласие представленных результатов с опубликованными экспериментальными данными других авторов.

Изучено распространение импульсных волн давления в жидкости, содержащей многослойные преграды разного сорта. Проиллюстрированы расчеты по искажению акустического сигнала при диагностике многослойного образца, содержащего слой жидкости с полидисперсными пузырьками. На основе полученных результатов отражения звукового сигнала от слоя конечной толщины, содержащей аэрозоль или пузырьковую жидкость, выведены соотношения между длиной волны и толщиной слоя, при которых коэффициент отражения принимает экстремальные значения. Проиллюстрировано влияние сорта газа на динамику процесса. Показано согласие теоретических и экспериментальных данных.

Теоретически и экспериментально исследованы нелинейные колебания аэрозолей и поведение частиц в трубах в ударно- и безударно волновом режимах. Показана немонотонная зависимость времени осаждения табачного дыма от степени заполнения закрытой

трубы при резонансных частотах колебания поршня. Проанализировано влияние формы резонаторов на осаждение мелкодисперсных аэрозолей при волновом воздействии. Представлены результаты численных расчетов распространения ударных волн в газозвзвесьях и ударно-волновой разлет газозвеси в двухкомпонентный газ. Показано хорошее согласие теории и опытных данных.

Список литературы:

1. Динамика двухфазных парогазокапельных сред. Губайдуллин Д.А./ Изд-во Казанского математического общества. 1998. 153с.
2. Gubaidullin D.A., Nigmatulin R. I. On theory of acoustic waves in polydispersed gas-vapor-droplet suspension // Int. J. Multiphase Flow. 2000. V.26. N.2. P.207-228.
3. Губайдуллин Д.А. Сферические и цилиндрические волны малой амплитуды в полидисперсных туманах с фазовыми превращениями // Известия РАН. МЖГ. 2003. №5. С.85-97.
4. Губайдуллин Д.А., Федоров Ю.В. Особенности отражения акустических волн от границы или слоя двухфазной среды // Акуст. журн. 2018. Т.64. №2. С.162-173.
5. Gubaidullin, D.A., Ossipov, P.P., Abdyushev, A.A. Simulation of aerosol distribution in hyperbolic resonator // Appl. Math. Modelling. 2018. V.62. P.181-193.
6. Gubaidullin D.A., Zaripov R.G., Tkachenko L.A., Shaidullin L.R. Deposition of polydisperse gas suspensions with nonlinear resonance oscillations in a closed tube // J. Acoust. Soc. Am.. 2019. V.145. N.1. P.EL30-EL33.
7. Губайдуллин Д.А., Осипов П.П. Аэрогидродинамика твердой частицы. // М.: Физматлит, 2020. 176 с.
8. Gubaidullin D.A., Ossipov P.P., Abdyushev A.A. Simulation using the limiting velocity approach of acoustic streaming establishment and aerosol particle focusing in complex-shaped acoustofluidic devices // Appl. Math. Modelling, 2021. V. 92. P. 785 - 797.
9. Gubaidullin D.A., Fedorov Yu. V. Acoustics of a viscoelastic medium with encapsulated bubbles // J. of Hydrodynamics, 2021. 33 (1). P. 55-62.
10. Gubaidullin, D.A., Snigerev, B.A. Numerical simulation of forced acoustic gas oscillations with large amplitude in closed tube // Wave Motion, 2022. 112,102941.
11. Gubaidullin D. A., Zaripov R. G., Tkachenko L. A., Shaidullin L. R. Aerosol deposition on resonances at nonlinear oscillations in a closed cross section jump tube // Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2022. DOI 10.1007/s00161-022-01151-2.
12. Gubaidullin D.A., Gubaidullina D.D., Fedorov Yu.V. Mathematical Modeling of the Wave Dynamics of an Encapsulated Perfluorocarbon Droplet in a Viscoelastic Liquid // Mathematics, 2023, 11. 1083.

*Исследование выполнено за счет гранта
№ 20-11-20070 Российского научного фонда.
<http://rscf.ru/project/20070>*

УДК 536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В АДИАБАТНЫХ УСЛОВИЯХ И В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА В ПЛОСКОМ МИКРОКАНАЛЕДементьев Ю.А.^{1,2}, Роньшин Ф.В.^{1,2}, Чиннов Е.А.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Тепловыделение в процессорах современных электронных устройств не является равномерным как в пространстве, так и во времени. Согласно данным фирмы Huawei локальные плотности тепловых потоков могут достигать 15 кВт/см² на пятнах размером порядка 10 мкм. Происходит значительное изменение плотностей тепловых потоков во времени. В некоторых условиях возможно резкое возрастание тепловых потоков. Задачей теплоотводящих устройств является также возможность кратковременного поддержания приемлемых температурных условий в процессорах при резком росте тепловыделения. Для этих целей необходимо создание таких теплоотдающих поверхностей, которые бы обеспечить значительное увеличение коэффициентов теплоотдачи при резком возрастании тепловых потоков.

Ситуация с отводом тепла еще более усложняется в связи с переходом электронной промышленности на производство трехмерных чипов, где несколько подложек с электронными компонентами устанавливаются параллельно с расстоянием в 50–100 мкм. Еще в марте 2014 года GLOBALFOUNDRIES объявила о создании трехмерной архитектуры процессоров. Электронная промышленность уже сегодня готова производить компоненты, где средняя плотность теплового потока может достигать величины 1 кВт/см² [1] и выше. Для охлаждения таких объектов микроэлектроники отвод тепла должен осуществляться непосредственно из зон его выделения, то есть посредством каналов размером порядка 50 мкм. Решение этой задачи сопряжено с рядом проблем. В частности, с уменьшением размеров каналов происходит рост давления. Использование жидкостных систем в данном случае затруднительно. В связи с происходящим ростом объемов передачи данных и необходимостью охлаждения обрабатываемых их электронных устройств разрабатывается концепция общего газового охлаждающего контура с локальным вводом жидкости в область интенсивного тепловыделения. Актуальным является применение двухфазных систем с вводом жидкости вблизи зоны испарения (короткие микроканалы). Применение микроканалов позволяет существенно уменьшить среднюю толщину пленки в двухфазных течениях, что ведет к интенсификации теплообмена при испарении [2]. В связи с этим для широкого круга технических приложений важное значение имеет понимание процессов в мини- и микроканалах, которые обеспечивают наиболее эффективные процессы тепло- и массопередачи.

Данная работа посвящена изучению двухфазного газожидкостного течения в условиях локального нагрева в микроканале 0,055x10 мм².

С помощью оптической шпирен системы зарегистрированы следующие режимы течения: струйный, снарядный, вспененный, кольцевой, переходной, осушенный. Показано, что с увеличением теплового с 0 до 2 Вт/см² область снарядного течения возрастает, переходная зона уменьшается. Границы режимов на картах для 2 и 5 Вт/см² практически не меняются. При увеличении теплового потока на всех режимных картах область струйного режима переходит в осушенную область.

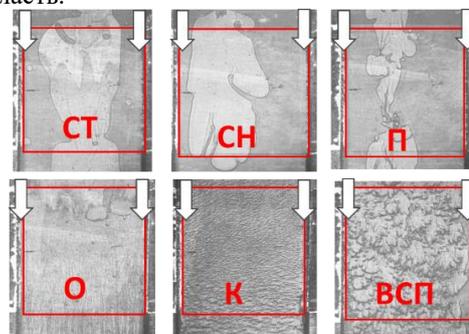


Рис. 1. Режимы течения в микроканале 0,055x10 мм² в адиабатном случае. Режимы течения: СТ–струйный, СН–снарядный, П–переходной, О–осушенный, К–кольцевой, ВСП–вспененный.

Обнаружена интенсификация неустойчивости Саффмана-Тейлора в струйном и снарядном режимах течений, которая меняет структуру течений и увеличивает область контактных линий. Исследована динамика сухих пятен в зависимости от теплового потока. Для теплового потока 5 Вт/см² при увеличении массовой скорости газа сначала наблюдается ухудшение теплоотдачи за счет осушения пленки жидкости и образования сухих пятен, затем наблюдается рост теплоотдачи во всем диапазоне массовых скоростей, когда сухие пятна замыкаются. Максимальная теплоотдача достигается в кольцевом режиме течения.

Список литературы:

1. Nasr M.H., Green C.E., Kottke P.A., Zhang X., Sarvey T.E., Joshi Y.K., Bakir M.S., Fedorov A.G., Flow regimes and convective heat transfer of refrigerant flow boiling in ultra-small clearance microgaps // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. V.108. P.1702-1713.
2. Plawsky, J.L., Fedorov, A.G., Garimella, S.V., Ma, H.B., Maroo, S.C., Chen, L., & Nam, Y. Nano-and microstructures for thin-film evaporation—a review. // Nanoscale and microscale thermophysical engineering. 2014. V.18. N.3. P. 251-269.

УДК 621.9

ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Держо О.Г.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследование уединённых длинных гравитационных волн, как в глубокой, так и в мелкой жидкости вызывает большой интерес, как среди океанографов, так и других областей науки. Такие волны имеют фазовую скорость больше скорости линейных возмущений также как и для известных солитонных решений уравнений Бенджамина-Оно (БО) и Кортевега – де Вриза (КдВ). Волны в слое стратифицированной жидкости окружённой бесконечно глубокой однородной жидкостью изучались в [1], где было выведено приближенное уравнение, содержащее интеграл Гильберта, так называемый псевдодифференциальный оператор, описывающий дисперсионные свойства волны. В [1] рассмотрены волны малой, но конечной амплитуды. Следовательно, введенная нелинейность включает только квадратичные члены, если не рассматривать случай, когда квадратичная нелинейность пренебрежимо мала вследствие определённой гидрофизической структуры. Представленные в данной работе асимптотические модели предназначены для описания как распространения гравитационных волн в тонком стратифицированном слое, зажатом между двумя глубокими однородными жидкостями так и для распространения длинных внутренних волн в мелкой жидкости. Выберем d для обозначения невозмущённой толщины стратифицированного слоя (половина толщины стратифицированного слоя в безразмерном виде считаем равным 1), $\rho(z)$ профиль поля плотности, «0» означает невозмущённое состояние, η обозначаются границы стратифицированного слоя, изменяющиеся при волновом движении. Никаких предположений о малости амплитуды волны сделано не было и подход действителен вплоть до амплитуды обрушения волны. Для случая небольшого превышения амплитуды над критическим уровнем, похожая теория также была построена. Схема проблемы в глубокой жидкости показана на рис. 1.

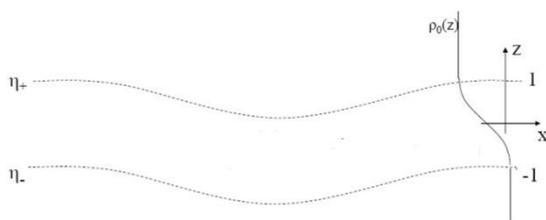


Рис.1. Схема проблемы в глубокой жидкости.

Профиль плотности в стратифицированном слое, заключенном между двумя глубокими однородными слоями, считается близким к линейному. Отклонение от постоянной плотности масштабируется параметром Буссинеска σ , волна считается длинной, то есть горизонтальный масштаб L намного больше, чем вер-

тикальный масштаб $h=d/2$. Схема физической проблемы для случая внутренних волн мелкой жидкости над непроницаемым дном показана на рис.2.



Рис.2. Схема проблемы для случая внутренних волн мелкой жидкости.

Аналогичная теория была построена и для волн большой амплитуды, как содержащих, так и не содержащих внутри себя замкнутые линии тока. Результатом такой теории стало уравнение типа Кортевега-де Вриза со сложной нелинейностью, зависящей как от профилей плотности и внешнего сдвигового потока, так и от превышения амплитуды волны над критическим значением, после которого возникают замкнутые линии тока. Общий результат для волн как в глубокой, так и в мелкой жидкости, состоит в колоколообразной форме линий тока для волн с амплитудами, меньше критической. Для глубокой жидкости асимптотики амплитудной функции являются степенными, а для мелкой жидкости, экспоненциальными. Таким образом, отличие в форме волн без замкнутых линий тока для глубокой и мелкой жидкости, качественно не отличаются. Если волна имеет внутри себя замкнутые линии тока, то она уширяется, в пределе ширина может стать бесконечной, теории для волн малой амплитуды такой эффект не предсказывают, хотя эксперименты его подтверждают как для геометрий глубокой, так и мелкой жидкостей. Фундаментальное отличие таких геометрий проявляется для скорости распространения волн с замкнутыми линиями тока. Теоретически показано, что в глубокой жидкости, скорость распространения волны большой амплитуды (с вихрём внутри) растёт быстрее и имеет большее значение, чем предсказывается теорией, справедливой для волн малой амплитуды. Данный эффект подтверждён и экспериментально многими работами, например [2]. Для случая мелкой жидкости ситуация обратная, скорость волны с вихрём внутри, меньше, чем предсказывается теорией Кортевега-де Вриза для волн малой амплитуды.

Список литературы:

1. Benjamin T.B. Internal waves of permanent form in fluids of great depth. // J. Fluid. Mech. 1967. V.29. P.559–92
2. Stamp A.P. and Jacka M. Deep-water internal solitary waves. // J. Fluid Mech. 1995. V.305. P.347–71.

Работа выполнена в рамках государственного задания для ИТ СО РАН

УДК 621.9

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТУРБУЛИЗАТОРОВ ПОТОКА НА ГАЗСОДЕРЖАНИЕ И МАССООБМЕН ПУЗЫРЬКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

Евдокименко И.А.^{1,2}, Лобанов П.Д.¹,
Блель В.², Джентрик К.², Си-Ахмед Э-К.², Легран Д.², Е. Марэк²

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Nantes Université, CNRS, GEPEA, UMR 6144,
44600, France, Saint-Nazaire, 37 Bd de l'Université

Применение пассивных завихрителей потока позволяет контролировать интенсивность процессов тепло- и массопереноса в промышленных установках. Одним из примеров таких установок являются аппараты для выращивания микроводорослевых культур – фотобиореакторы. Фотобиореактор по типу пузырьковой барботажной колонны представляет собой канал с фиксированным объемом жидкости в который подается газ в виде пузырей. Завихрение потока позволяет увеличить время пребывания газовых пузырей в реакторе, тем самым увеличивая перемешивание и время контакта между фазами, что, в свою очередь, повышает продуктивность культивирования. Создание серии расширений/сужений канала при помощи введения конструктивных элементов в канал является одним из способов турбулизовать поток.

Целью работы является оценка влияния введения пассивных завихрителей на гидродинамическую структуру и массообмен в фотобиореакторе по типу прямоугольной пузырьковой колонны.

Экспериментальная установка представляет собой прозрачный оргстеклянный прямоугольный реактор с размерами 200x50x800 мм. В качестве турбулизаторов потока использовались элементы прямоугольного и трапециевидного сечения, установленные на различных высотах для создания серии расширений/сужений канала. Реактор был заполнен водой до уровня 53 см. Ввод рабочего газа осуществлялся с помощью 36 капилляров с диаметром 0,5 мм через основание канала. Расход газа регулировался с помощью массового расходомера с максимальным расходом газа 60 л/мин. Для определения истинного газосодержания использовался метод измерения дифференциального давления ($\Delta H=500$ мм). Визуализация течения осуществлялась при помощи метода теневой съемки.

Были получены данные об истинном газосодержании в пузырьковой колонне в диапазоне приведенных скоростей газовой фазы от 0 до 9 см/с. Показано, что для данной конфигурации пузырьковой колонны выделяется три режима течения: гомогенный, переходный и гетерогенный. Отмечается, что в пузырьковой колонне с шестью вставками прямоугольного сечения истинное газосодержание ниже, чем в конфигурации без модификаций. Это связано с увеличением коалесценции пузырей.

При использовании трапециевидных вставок создавался каскад постепенных расширений/сужений канала. Примечательно, что для двух видов ступеней существует зона свободной от газа жидкости.

Пример визуализации пузырькового течения за парой ступеней прямоугольного сечения показан на рис.1.

Для оценки объемного коэффициента массообмена $K_L a$ использовался метод определения концентрации растворенного в воде кислорода. Было показано, что введение пассивных турбулизаторов позволяет интенсифицировать массопередачу на величину до 30% по сравнению с колонной без геометрических вставок. Объемный коэффициент массообмена растет при увеличении приведенной скорости газа.

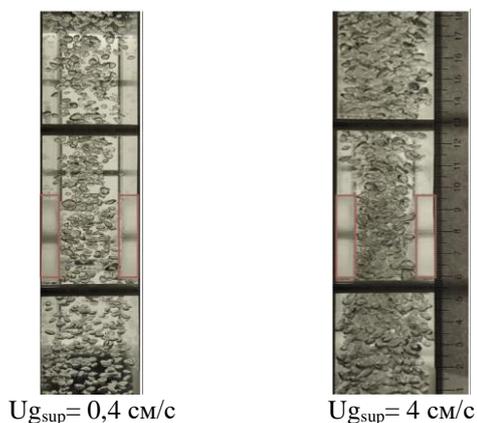


Рис. 1. Визуализация пузырькового течения.

Было проведено экспериментальное исследование пузырькового течения в прямоугольной пузырьковой колонне с использованием пассивных завихрителей различной геометрии. Показано, что выделяются три режима течения, которые схожи для всех исследуемых конфигураций. Также, отмечается, что введение турбулизаторов оказывает влияние на гидродинамическую структуру течения увеличивая зоны рециркуляции жидкости, а также создавая условия для коалесценции пузырей. Это, в свою очередь, позволяет интенсифицировать процессы массообмена между фазами.

Список литературы:

1. E. Olmos Midoux, Institut national polytechnique de Lorraine, Étude expérimentale et numérique des écoulements gaz-liquide en colonne à bulles,” 2006.
2. N. Thomas, “Effect of bubble column dimensions on flow regime transition,” Chem. Eng. Sci., Jan. 2001, Accessed: Jun. 28, 2022.
3. Aloui, F., Souhar, M., 1996b. Experimental study of a two-phase bubbly flow in a flat duct symmetric sudden expansion. Part I: Visualization, pressure and void fraction. Int. J. Multiphase Flow. 22 (4). P. 651-665.

Работы выполнены в рамках госзадания ИТ СО РАН

УДК 532.5

НИСКОДИССИПАТИВНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ МНОГОФАЗНОЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ СМЕСИ

Есипов Д.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Течения многофазных многокомпонентных несжимаемых смесей встречаются во многих технических устройствах и природных процессах. В связи с этим актуальным является их численное моделирование. Математические модели таких процессов можно разделить на три иерархические группы [1].

В первую группу попадают модели, в рамках которых движение каждой компоненты описывается своей системой уравнений Навье – Стокса в рамках гипотезы взаимопроникающих континуумов. При этом взаимодействие компонент описывается силами взаимодействия, которые добавляются в правую часть уравнений импульса. Конкретные выражения для этих сил выписать затруднительно, так как их величина зависит от большого количества процессов и факторов. Определение их экспериментальным путем, подчас невозможно из-за трудностей создания специализированных измерительных установок.

В следующую группу попадают модели, в которых течение смеси целиком описывается уравнениями Навье – Стокса, а эволюция концентрации компонент в пространстве описывается соответствующими уравнениями переноса. Причем скорость движения, у каждой компоненты своя. Такие модели получили название однодавленческих и многоскоростных. В случае несжимаемости смеси здесь можно выделить два подхода к моделированию. В первом из них движение смеси описывается среднemasсовой скоростью. В этом случае уравнения Навье – Стокса для смеси имеют вид, как у сжимаемой среды. Во втором движение смеси описывается среднеобъемной скоростью. Теперь уравнения Навье – Стокса для смеси имеют вид, как у несжимаемой среды. Выбор одного из этих двух подходов является нетривиальным. Эта группа моделей получила наибольшее распространение несмотря на то, что в ней пренебрегается некоторыми эффектами межкомпонентного взаимодействия.

Третья группа моделей характеризуется одним давлением для всех компонент и одной скоростью движения. Эти модели, с одной стороны, являются наиболее простыми по своей реализации, а с другой, они совершенно не учитывают движение компонент друг относительно друга.

В рамках настоящей работы предложена оригинальная модель течения многофазных многокомпонентных несжимаемых смесей из второй группы, использующая описание движения смеси среднеобъемной скоростью. При этом газообразные компоненты учитываются как пузыри заданных размеров, а твердые как дисперсная фаза с частицами заданных размеров. Для математической модели был разработан низкодиссипативный численный метод решения уравнений модели. В его основу положена оригинальная модификация метода SIMPLE и WENO-схема пятого порядка точности для решения уравнений Навье – Стокса и системы уравнений переноса соответственно.

Программная реализация метода была сделана в виде программы на языке Fortran-95, и она была проверифицирована на решении ряда тестовых задач многокомпонентной гидродинамики: задаче об эволюции формы всплывающего пузырька, задаче о неустойчивости Рэлея – Тейлора, задаче о круговом перемешивании двух жидкостей. В докладе будут обсуждаться особенности построения математической модели, соответствующего ей численного метода и результаты верификации.

Список литературы:

1. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. Часть 1. М.: Наука, 1987. 464 с.

УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ШЛАМА БУРОВЫМИ РАСТВОРАМИ, МОДИФИЦИРОВАННЫМИ НАНОВОЛОКНАМИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**Жигарев В.А.¹, Минakov А.В.^{1,2}, Лысакова Е.И.¹, Скоробогатова А.Д.¹, Гузей Д.В.^{1,2}**¹ Сибирский федеральный университет,

660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Современные буровые растворы имеют много различных свойств, на которые в той или иной степени могут влиять добавки наночастиц. Наножидкости стали использоваться для управления реологическими свойствами и контроля процесса фильтрации бурового раствора, для снижения коэффициента трения буровой трубы и стенок скважины и предотвращения таких явлений, как прихват буровой колонны. В ряде работ показано, что благодаря добавке наночастиц можно значительно улучшить свойства буровых растворов [1]. При этом, несмотря на некоторые имеющиеся разногласия, о которых будет сказано ниже, большинство исследователей сходятся во мнении, что наночастицы оказывают гораздо более сильное влияние на свойства буровых растворов, чем микроскопические частицы. Это влияние проявляется при очень низких концентрациях и зависит от размера и материала наночастиц. Это дает возможность управлять свойствами буровых растворов. Поэтому изучение свойств буровых растворов с наночастицами является очень перспективным с практической точки зрения.

Вязкость и реология буровых растворов играют важнейшее значение для их применения, поскольку от них зависят потери давления при промывке скважины, эффективность выноса шлама, устойчивость ствола скважины и многие другие факторы при бурении.

Для изучения влияния добавок наночастиц на вынос шлама проведена серия расчетов по определению эффективности выноса шлама из модельной скважины буровыми растворами модифицированными нановолокнами оксида алюминия.

Базовый буровой раствор на углеводородной основе представляет собой обратную эмульсию, т.е. эмульсию, в которой вода диспергирована на мельчайшие капельки, а дисперсионной средой служит углеводородная жидкость «вода в масле». В качестве углеводородной основы растворов использованы следующие компоненты: низковязкое базовое масло «REBASE» PC-230 (ООО «НПО «РЕАСИБ», г. Томск) марки В1. В работе исследовано наиболее типичное для буровых растворов соотношение углеводородной фазы и воды, равное 65/35. Для стабилизации эмульсии использовался неионогенный эмульгатор «REBASE» PC-510, предназначенный для создания обратных эмульсий. Концентрация частиц в растворах варьировалась от 0.25 до 2 мас. %. Для моделирования выноса шлама из скважины использовался подход гранулированной среды. Рассматривалось турбулентное течение бурового раствора. Для моделирования

турбулентности использовалась двухпараметрическая k- ω SST модель. Более подробно модель представлена в работах [2-3].

Расчетная область представляет собой кольцевой канал, образованный двумя гладкими прямыми трубами круглого сечения. Внутренняя труба может вращаться вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью. На входе в кольцевой канал задается постоянное значение массового расхода Q. На поверхностях труб выполняются условия прилипания.

Для расчета течений в скважине при прокачивании модифицированного бурового раствора выбраны типичные параметры процесса бурения наклонно-направленных скважин. Диаметр внутренней трубы равен $D_1=0,127$ м, диаметр внешней трубы равен $D_2=0,2207$ м. Скорость вращения буровой трубы варьировалась от 40 до 120 об/мин, расход бурового раствора 10 кг/с. Плотность бурового раствора была равна 948 кг/м³. Реология буровых растворов задавалась из экспериментальных данных. Для моделирования использовалась реологическая модель Хершеля - Балкли как наиболее общая.

Проведена серия расчетов, в которых варьировалась концентрация и нановолокон оксида алюминия.

Было показано, что коэффициент эффективности выноса шлама для УВ раствора с добавкой нановолокон оксида алюминия оказывает более весомое влияние на коэффициент эффективности выноса шлама, так добавка 2 мас. % наночастиц повышает эффективность выноса шлама на 35%. Такое влияние добавок наночастиц на эффективность выноса шлама вызвано уменьшением разницы в скоростях несущего бурового раствора и частиц.

Список литературы:

1. Наножидкости и «умные жидкости» в технологиях разработки нефтегазовых месторождений / И.Н. Евдокимов; М. ООО «Издательский дом Недра», 2016. 247 с.
2. Zhigarev V.A., Minakov A.V., Neverov A.L. and Pryazhnikov M.I. Numerical study of the cuttings transport by drilling mud in horizontal directional well // J. Phys.: Conf. Ser. 2019, 1382 P.1-6.
3. Minakov A.V., Zhigarev V.A., Mikhienkova E.I., Neverov A.L., Buryukin F.A., Guzei D.V. The effect of nanoparticles additives in the drilling fluid on pressure loss and cutting transport efficiency in the vertical boreholes // J. Pet. Sci. Eng. 2018. V. 171. P. 1149–1158.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>

УДК 532.5

АКСИАЛЬНОЕ И АЗИМУТАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ВОЛН ВОЗМУЩЕНИЯ В ГАЗОЖИДКОМ ТЕЧЕНИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Здорников С.А.^{1,2}, Исаенков С.В.¹, Черданцев А.В.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Газожидкостные течения в горизонтальных трубах находят своё применение в теплообменниках, в системах охлаждения, в нефтегазовой промышленности и других отраслях. В горизонтальной ориентации газожидкостные течения характеризуются асимметричным распределением жидкой плёнки в азимутальном направлении, что затрудняет изучение таких течений.

В зависимости от расходов жидкости и газа реализуются различные режимы течения, отличающиеся волновой структурой. При переходе от стратифицированного к кольцевому режиму происходит подъём жидкости по стенкам канала. За время исследования этой проблемы было выдвинуто три группы гипотез: внутренние течения в газе, перенос капель и волновые процессы. Остаётся нерешённой проблема, какой из механизмов играет в этом главную роль.

На поверхности жидкой фазы в условиях высоких скоростей газа образуются и развиваются волны возмущения [1] – нелинейные одиночные крупные волны, движущиеся с высокой скоростью на большом расстоянии друг от друга. Они представляют наибольший интерес среди волновых структур, так как они участвуют в процессе срыва капель, с их появлением перестраивается газовое ядро, изменяется площадь и шероховатость межфазной границы, локальная интенсивность перемешивания жидкости и отвода тепла от стенок канала.

В данной работе методом лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF) [2] изучены режимы течения в области перехода стратифицированный-кольцевой водовоздушные потоки со скоростями газа 10-40 м/с и числами Рейнольдса жидкости 60-400 в горизонтальной трубе внутренним диаметром 20 мм. В ходе экспериментов с помощью пространственно-временного представления данных (см. рис. 1) исследованы и проанализированы пространственно-временные записи толщины жидкой плёнки в различных азимутальных положениях. Замечено, что до того, как появляются волны возмущения, жидкость уже смачивает стенки трубы, что свидетельствует о том, что основным механизмом установления кольцевого режима являются вторичные течения в газе. В рамках визуального анализа выделено пять этапов стабилизации течения в азимутальных положениях, отличных от нижней части канала. Заключение, что волны возмущения образуются только в нижней части трубы. Вниз по потоку волны растут в азимутальном направлении и в итоге замыкаются в кольцо.

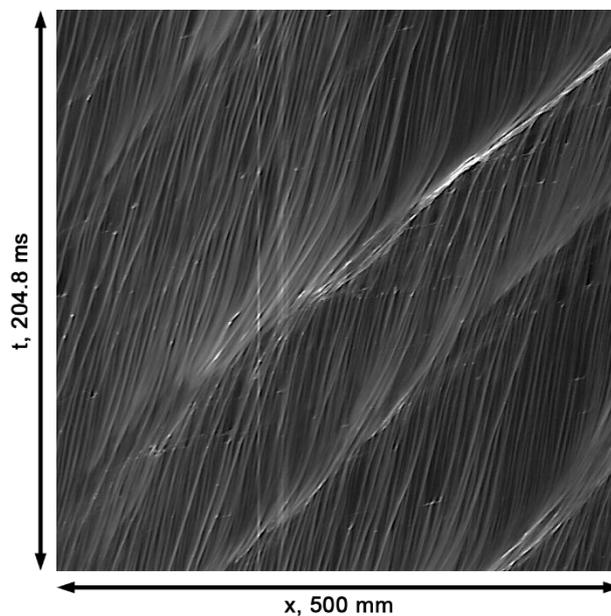


Рис. 1. Пространственно-временная эволюция толщины плёнки в верхней части канала (скорость газа 20 м/с, расход жидкости 18,8 мл/с).

Измерены основные характеристики волн возмущения: частота волн, их скорость и амплитуда, а также получены их зависимости от расстояния до входа в канал и от азимутального угла. Обнаружено, что на тонкой плёнке жидкости крупномасштабные волны не образуются. В условиях высоких скоростей газа практически все волны возмущения, образовавшиеся в нижней части канала, достигают его верхней части в области установления, причём части этих волн движутся с почти одинаковой скоростью. При низких расходах жидкости скорость волн возмущения стабилизируется, а при высоких расходах жидкости – продолжает расти. Амплитуда волн так же, как и толщина жидкой плёнки, неравномерна в азимутальном направлении.

Список литературы:

1. Hewitt G.F., Jayanti S., Hope C.B. Structure of thin liquid films in gas-liquid horizontal flow // International journal of multiphase flow. 1990. Т. 16. №. 6. С. 951-957.
2. Cherdantsev A.V., Zdornikov, S.A., Cherdantsev, M.V., Isaenkov, S.V., Markovich, D.M. Stratified-to-annular gas-liquid flow patterns transition in a horizontal pipe // Experimental Thermal and Fluid Science. 2022. Т. 132. С. 110552.

Работа выполнена при поддержке
Российского научного фонда, проект 19-79-30075

УДК 53.092

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ТОНКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАПЕЛЬ ПРИ ПАРОВЫХ ВЗРЫВАХ

Ивочкин Ю.П.¹, Ковешников К.С.^{1,2}, Кубриков К.Г.¹, Синкевич О.А.^{1,2}, Тепляков И.О.¹, Юдин С.М.^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, Красноказарменная, 14

Несмотря на более чем 50-летнюю историю исследования вопроса о причинах тонкой фрагментации жидкометаллических капель при паровых взрывах, механизм этого явления изучен недостаточно полно. Об этом, в частности, свидетельствует многообразие кардинально отличающихся друг от друга физических гипотез, посвященных этой проблеме. Одна из них, так называемая кавитационно-акустическая гипотеза, активно используется для толкования процесса диспергирования металлических оловянных капель при воздействии на них импульсного лазерного излучения [1]. Подобная гипотеза также применяется при описании дробления водной капли при воздействии на нее резким механическим ударом [2]. В последнем случае, амплитуда внешних импульсов давления, длительность которых составляет несколько микросекунд, ~15 МПа.

В контексте с указанными работами в докладе приведены экспериментально-расчетные оценки возможности разрушения горячих жидкометаллических капель по кавитационно-акустическому механизму при воздействии импульсов давления, сгенерированных коллапсом паровых пузырей, которые образуются при контакте охлаждающей жидкости с сильно перегретой поверхностью. Исследования, моделирующие мало-масштабные паровые взрывы, выполнены с учетом отличий условий фрагментации жидкометаллических капель при лазерном воздействии и резкой смене режима кипения охладителя.

Проведенные специальные эксперименты, подкрепленные расчетами, показали (рис. 1), что максимальное значение импульса давления, обусловленное коллапсом парового пузыря, непосредственно на поверхности капли может достигать ~ 20 МПа при длительности импульса несколько микросекунд. Значения отрицательных давлений, вызванных отражением ударных волн от внутренней граничной поверхности капли, по порядку величины соответствует (по модулю) амплитуде внешнего воздействия. Интенсивные импульсы давления в проведенных опытах генерируются с характерным временным интервалом – единицы миллисекунд. Последнее обстоятельство позволяет в расчетах предположить, что чередующиеся импульсы давления не влияют друг на друга.

Результаты расчетов (рис. 2), выполненных в акустическом приближении при одновременном ударном воздействии сразу на нескольких участках поверхности капли, свидетельствуют о линейном характере зависимости отрицательного давления от количества центров взрывного вскипания жидкости.

Образование твердой оксидной пленки на поверхности капли позволяет, в первом приближении, не

учитывать деформацию поверхности, что существенно упрощает проведение расчетов.

Полученные результаты не противоречат предположению о возможности тонкой фрагментации жидкометаллических капель по кавитационно-акустическому механизму. Следует также отметить, что численные расчеты проведены без учета газов, растворенных в жидких металлах. Данный эффект способствует образованию кавитации и, вполне вероятно, может быть использован для управления процессом тонкой фрагментации расплава.

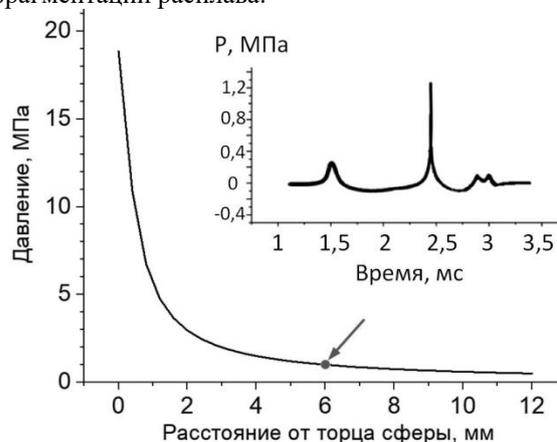


Рис. 1. Зависимость давления в воде от расстояния расположения датчика до нагретой поверхности. На врезке показана характерная форма импульса давления.

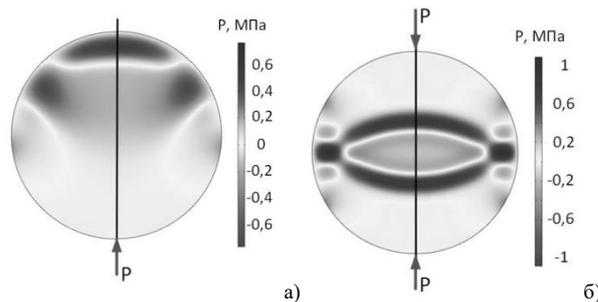


Рис. 2. Характерный вид поля давления в момент времени 6,5 мкс (а) при одном и (б) двух источниках импульса давления.

Список литературы:

1. Kurilovich D, Pinto T.F., Torretti F. et al. Expansion Dynamics after Laser-Induced Cavitation in Liquid Tin Microdroplets // Phys. Rev. Appl. 2018. V.10. P.054005.
2. Давыдов М.Н., Кедринский В.К. Метод сглаженных частиц в задачах моделирования кавитационного разрушения жидкости при ударно-волновом нагружении // ПМТФ. 2013. Т.54. №6. С. 17-25.

УДК 621.565.82

ГАЗИФИКАЦИЯ ЖИДКОГО АЗОТА В СМЕСИТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ

Колышкин Л.М., Шакуров А.В.

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана,
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская, 5 к.1

Методы газификации криогенных жидкостей обычно основаны на использовании теплоты окружающей среды или нагревательных элементов, что не позволяет полезно использовать теплоту фазового перехода. Также не всегда возможно осуществлять контакт криогенной жидкости с объектом охлаждения. Это приводит к необходимости предварительной газификации криогенной жидкости и использования криогенного смесительного газификатора. Причем, имеется ранее нереализованная необходимость проведения газификации в динамически изменяемых режимах тепловой нагрузки, иметь возможность регулировать температуру и расход газа на выходе (например, для криогенных аэродинамических труб и криотерапевтических установок [1-2]). Исходя из этого, цель настоящей работы: разработка и исследование криогенного смесительного газификатора с регулируемой производительностью.

На основе существующих подходов к проектированию распылительных систем и аппаратов, используя данные, полученные из исследований в области распыления жидкого азота создана методика расчета криогенного распылителя [3-6]. Проведено экспериментальное исследование распыления жидкого азота в потоке воздуха в ограниченном пространстве, позволяющее оценить зависимость расхода через форсунку от давления в сосуде. Спроектирована проточная часть криогенного смесительного газификатора, позволяющая увеличить компактность аппарата и обеспечить стабильный режим работы и непрерывное испарение азота в двух вариантах: спиральный [7] и противоточный (см. рис. 1).

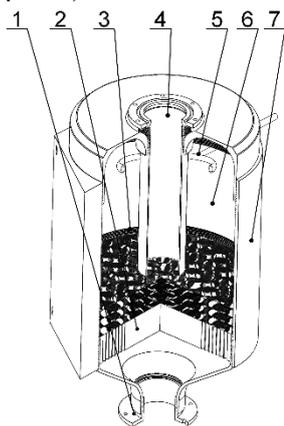


Рисунок 1. Противоточный газификатор: 1 – вход газа, 2 – выравниватель потока, 3 – гироидная насадка, 4 – выход азотовоздушной газовой смеси, 5 – распылитель, 6 – внутреннее пространство, 7 – клапан стенки.

Проведено экспериментальное исследование характеристик криогенного смесительного газификатора (расходы жидкости и газа, температура на входе и выходе). Исследованы предельные режимы работы

аппарата, в которых возможна его эксплуатация до наступления режима «залива». Исследованы возможности регулирования производительности аппарата за счет импульсной подачи жидкого азота в распылитель. Исследованы возможности применения технологии FFF 3Д печати для изготовления аппаратов, использующихся в условиях криогенных температур (пример, см. рис.2).

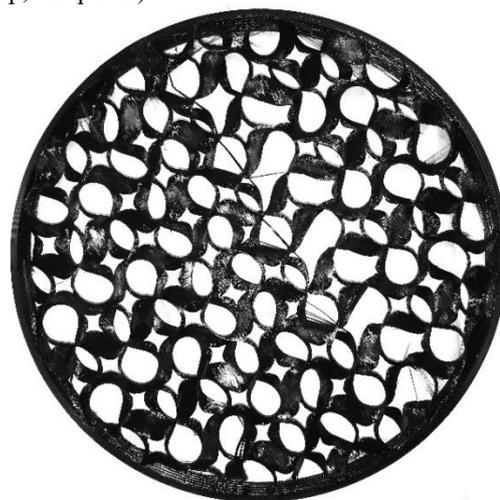


Рис. 2. Гироидная насадка, изготовленная методом FFF 3Д-печати (внешний диаметр 38 см, толщина 3 см).

На основе полученных экспериментальных данных составлены рекомендации к расчету и проектированию смесительных криогенных газификаторов.

Список литературы:

1. Баранов А.Ю. Научные основы разработки аппаратуры для общего криотерапевтического воздействия: дис. ... д.т.н. // Санкт-Петербург. 2014.
2. Burkov, I.A., Kolishkin, L.M., Pushkarev, A.V., Shakurov, A.V., Tsiganov, D.I., Zherdev, A.A. Experimental and computational thermal analysis of partial-body cryotherapy // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. 183. № 122194.
3. Xue R., Chen L., Zhong X., Liu X., Chen S., Hou Y. Unsteady cavitation of liquid nitrogen flow in spray nozzles under fluctuating conditions // Cryogenics. 2019. 97. P. 144-148.
4. Xue R., Ruan Y., Liu X., Chen L., Zhang X., Hou Y., Chen S. Experimental study of liquid nitrogen spray characteristics in atmospheric environment // Applied Thermal Engineering. 2018. 142. P. 717-722.
5. Srivastava P., Kumar A. Characterization of performance of multi-hole nozzle in cryospray // Cryobiology. 2020. 96. P. 197-206.
6. Xue R., Ruan Y., Liu X., Zhong X., Chen L., Hou Y. Internal and external flow characteristics of multi-nozzle spray with liquid nitrogen // Cryogenics. 2021. P.114.
7. Исследование режимов работы криогенного распылительного смесительного газификатора с регулируемой производительностью. / Шакуров А.В., Колышкин Л.М. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 01. 2023.

Исследование выполнено за счет гранта Российской научной фонды (проект № 22-19-00018)

УДК 532.1

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА НА ТОРЦЕ ВОЛНОВОДА**Косяков В.А., Фурсенко Р.В.**Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Недогретое кипение вблизи торца тонкого лазерного волновода, погруженного в холодную жидкость, может сопровождаться образованием кумулятивных струй. В результате подачи лазерного излучения по тонкому волноводу происходит нагрев и последующее испарение жидкости вблизи его торца. Это приводит к образованию парового пузыря диаметром от одного до нескольких калибров волновода в зависимости от мощности лазера и длины волны. Стадия роста сменяется схлопыванием пузыря, причина которого объясняется конденсацией пара, связанной с его охлаждением жидкостью, окружающей пузырь. В результате почти полной конденсации пара и схлопывания пузыря образуется струя жидкости кумулятивного характера, направленная от торца оптического волокна в сторону жидкости. Такая струя имеет многочисленные практические применения, начиная с очистки поверхностей [1] и заканчивая микрохирургией [2]. Поэтому исследования, связанные с изучением поведения таких струй и возможностью контролировать их скорость, представляют практический и фундаментальный интерес.

В работах [3,4], численно исследовалось схлопывание пузыря пара в недогретой жидкости и формирование струи вблизи лазерного волновода. Газ предполагался несжимаемым, а схлопывание пузыря вызвано исключительно конденсацией пара. В настоящей работе помимо стадии схлопывания, рассматривается также рост парового пузыря вблизи волновода, обеспеченным локальным нагревом жидкости, а также учитывается сжимаемость газа. Тем самым позволяя оценить вклад конденсации, относительно градиента давления в поведение пузыря и в формирование кумулятивной струи.

В работе предложена математическая модель, описывающая рост и схлопывание пузыря в результате испарения и конденсации газовой фазы. Эта модель позволяет напрямую управлять интенсивностью испарения и конденсации, варьируя параметры модели. Параметрическое исследование показало, что характеристики стадии роста определяют поведение и физические механизмы, влияющие на динамику пузыря на стадии схлопывания, а также на скорость струи. Интенсивное испарение, приводящее к неравновесному расширению пузырьков, заканчивается образованием области сильно разреженного газа. В этом случае большая разница давлений между газом и жидкой фазой является основным физическим механизмом, влияющим на время схлопывания пузыря и характеристики струи, тогда как влияние конденсации незначительно. С уменьшением скорости испарения отклонение стадии роста от равновесного процесса уменьшается и уменьшается межфазный перепад давления. Это приводит к увеличению вклада процесса

конденсации в динамику пузыря на стадии схлопывания. Скорость струи, образующейся после схлопывания пузыря, также зависит от параметров, характеризующих процесс конденсации. В случае расширения пузыря, близкого к равновесному, схлопывание пузыря с последующим образованием кумулятивной струи происходит исключительно за счет конденсации.

Таким образом, в зависимости от интенсивности испарения различают три режима лазерно-индуцированного недогретого кипения: режим, обусловленный давлением, переходный режим и режим, обусловленный конденсацией. Эти режимы четко разделены характерными значениями интенсивности испарения, неравномерностью стадии надувания пузыря и характерным масштабом времени. Информация о вкладе различных физических механизмов свидетельствует о том, что адекватное описание режима, обусловленного давлением, требует учета сжимаемости газа, тогда как часть переходного режима и режима, обусловленного конденсацией, может быть описана в рамках моделей несжимаемого газа.

Сопоставление с имеющимися экспериментальными данными (см. рис. 1) продемонстрировало хорошее качественное и количественное совпадение.

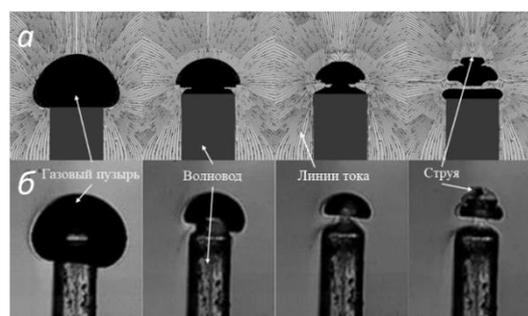


Рисунок 1. Сопоставление численных (а) и экспериментальных (б) данных.

Список литературы:

1. Chahine A.L., Kapahi A., Choi J.-K., Hsiao C.-T. Modeling of surface cleaning by cavitation bubble dynamics and collapse // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. V. 29. P. 528-549.
2. Vogel G., Hentschel W., Holzfuss J., Lauterborn W. Cavitation bubble dynamics and acoustic transient generation in ocular surgery with pulsed neodymium: YAG lasers // *Ophthalmology*. 1986. V. 93. No. 10. P. 1259-1269.
3. Kosyakov V. A., Zakharov A. D., Fursenko R. V. Numerical study of the solid walls effect on the velocity of a liquid jet formed as the result of vapor bubble collapse near a rod // *Far east mathematical journal*. 2022. V. 22. No. 2. P. 185-189.
4. Fursenko R., Chudnovskii V., Minaev S., Okajima J. Mechanism of high velocity jet formation after gas a bubble collapse near the micro fiber immersed in a liquid // *International Journal of heat and mass transfer*. 2020. V.163. P. 120420.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00189)

УДК 532.546

КАПИЛЛЯРНАЯ ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЯХ В ПОРИСТЫХ СИСТЕМАХ И ЗАСЫПКАХ

Кузнецов В.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Газожидкостные и двухжидкостные двухфазные течения широко распространены в природе и технике. Они встречаются при добыче нефти и газа, в энергетике и химической технологии при использовании пористых систем и засыпок для увеличения межфазной поверхности теплообменных аппаратов. Важнейшей особенностью таких течений является определяющее влияние капиллярных сил на структурные характеристики двухфазных течений, которые в значительной степени определяют интенсивность процесса теплообмена. Для математического описания структуры двухфазных течений на масштабе одиночной поры и больших ансамблей пор в последнее время широко используются методы диффузионной границы и статистические подходы [1], для верификации которых необходимы экспериментальные данные по локальной структуре течений.

В данной работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований многомасштабной капиллярной гидродинамики газожидкостных и двухжидкостных течений в пористых системах и засыпках, рассмотрено влияние структуры течения на конвективную диффузию и теплообмен.

Основываясь на экспериментах с легкоплавким сплавом Вуда, реконструирована форма порового пространства уплотненной засыпки микрошаров. Установлено, что одиночная пора представляет собой элемент сильно деформированной кубической решетки с параметрами, распределенными по углу ϕ - рис. 1. Для данной модели сформулированы условия заполнения порового сужения и расширения фазами, разрыва несмачивающей фазы в поровом сужении при дренаже и пропитке. Перепад давления в фазах $p_{1,2}$, при которых сужения и расширения пор заполняются смачивающей фазой, изменяются в широких пределах - рис.1, что определяет статистический характер заполнения пор фазой, смачивающей стенки пор. Для равновесного заполнения пор численно решена задача протекания для решеточной модели пористой среды, определены функция Леверетта и относительные фазовые проницаемости, которые хорошо соответствуют экспериментальным данным. С использованием прозрачной модели пористой среды с объемными порами выполнено детальное исследование микроструктуры двухфазного течения, определены условия применимости равновесного подхода для описания течений на микро- и макроуровне.

Для равновесного подхода численно решена задача вытеснения вязкой нефти водой в слоисто-неоднородной и кусочно-неоднородной пористой среде, получены условия стабилизации фронта вытеснения капиллярными силами для двухслойной пористой среды и повышения охвата пласта заводнением для кусочно-неоднородной пористой среды.

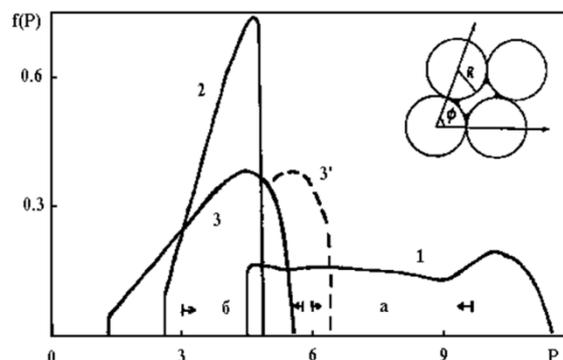


Рис.1. Плотность распределения дренирования сужения - 1, пропитки расширения - 2 и разрыва несмачивающей фазы в сужении в зависимости от параметра $P = p_{1,2} \sigma / R$.

Установлено, что при больших скоростях вытеснения пошаговое равновесное заполнение пор фазами изменяется вследствие нарушения последовательности заполнения пор и функциональные параметры определяются эффективной, а не реальной насыщенностью смачивающей фазы

$$\alpha(S) = S + D \cdot R(S) \cdot \frac{\partial S}{\partial t} \quad (1)$$

Параметр неравновесности D и функция неравновесности $R(S)$ определены с учетом формирования проводящих кластеров в неравновесных условиях.

Теоретически и экспериментально исследован нестационарный массоперенос при течении водного раствора NaCl в засыпке шаров и в двумерной прозрачной модели пористой среды в условиях неполного насыщения. Теоретический анализ выполнен в рамках модели Саффмана, основанной на анализе случайных блужданий частиц. Установлено, что для течения с капиллярно-защемленной фазой, возникает новый характерный размер, поэтому коэффициенты продольной диффузии существенно возрастают по сравнению с однофазным течением.

Экспериментально исследован теплообмен со стенкой при восходящем двухфазном течении в канале с засыпкой микрошаров, предложена двухслойная модель теплообмена со стенкой, учитывающая повышенную пористость и уменьшенную радиальную теплопроводность в пристенном слое. Определена взаимосвязь режима течения и коэффициента теплоотдачи, установлена область газосодержаний, в которой наблюдается интенсификация теплообмена.

Список литературы:

1. Multiphase flow in permeable media: A pore-scale perspective. / Blunt M.J. Cambridge university press. 2017. 500 p.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121031800215-4

УДК 532.5, 532.528

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИИ ЗА ЦИЛИНДРОМ С ТРЕУГОЛЬНЫМИ НАСечКАМИ, РАСПОЛОЖЕННОМ В МИНИКАНАЛЕ

Лобасов А.С.^{1,2}, Кравцова А.Ю.²

¹Сибирский федеральный университет

660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Развитие исследований кавитационных течений, возникающих в технических и природных системах, всегда напрямую связано с развитием различных промышленных отраслей. Так, впервые гидродинамическая кавитация в технических системах была экспериментально обнаружена в конце XIX века на гребных винтах судов. Для исследования этого явления были созданы специализированные экспериментальные контуры замкнутого типа, позволяющие изучать возникновение и развитие кавитации вблизи гребных винтов [1]. Решение таких задач привело к существенному усложнению оборудования гидродинамических труб: возникла необходимость регулировки давления, состояния воды в трубе, а также содержания растворенных газов.

В данной работе рассматривается гидродинамическая кавитация на цилиндре с насечками, расположенном в миниканале, геометрия и сетка для которого показаны на рис.1. Исследовано влияние давления жидкости на входе в миниканал, которое варьировалось в диапазоне от 3 бар до 30 бар. Для моделирования кавитационных процессов использовалась модель кавитации Zwart-Gerber-Belamgi. Для моделирования турбулентности использовалась DDES-модель. Длина миниканала была равна 36 мм, ширина – 2 мм, высота – 0,2 мм. Диаметр цилиндра был равен 1,14 мм. Треугольные насечки на поверхности цилиндра были нанесены таким образом, чтобы их вершины были направлены вдоль миниканала, и, при этом, они лежали на окружности диаметром 1,22 мм. Цилиндр с насечками занимал всю высоту канала.

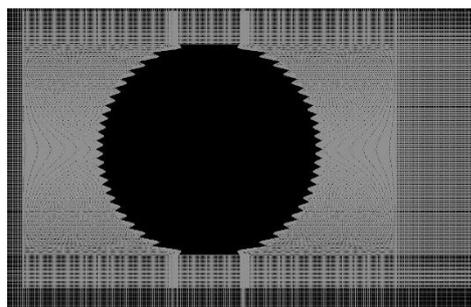


Рис. 1. Геометрия и расчётная сетка около цилиндра

В результате расчётов были получены зависимости от времени давления, скорости и объёмной доли пара в трёх точках, а также средние значения этих величин (см. рис. 2, 3). Установлено, что процесс кавитации начинается для давлений на входе выше 8 бар, причём паровые каверны возникают не только за цилиндром, но и на двух ближайших к стенкам миниканала насечках в передней части цилиндра. Было обнаружено, что появление кавитационного процесса существенно

влияет на процесс гидродинамического обтекания цилиндра, а именно, вихревая дорожка за цилиндром преобразуется в след, и на границе между паровой каверной и жидкостью возникает структура, похожая на неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.

Диапазон значений давления на входе, при котором существует появляется и существует кавитационный процесс подтверждается не только качественно, но и количественно зависимостями, приведёнными на рис. 2, 3. Видно, что давление в трёх точках за цилиндром падает до давления насыщения (рис. 2а), объёмная доля пара растёт (рис. 3а), а число кавитации становится меньше единицы (рис. 3б). Скорость в этих точках также существенно снижается при давлениях на входе в миниканал выше 8 бар (рис. 2б), а потом начинает постепенно расти, что подтверждает наличие перестройки течения.

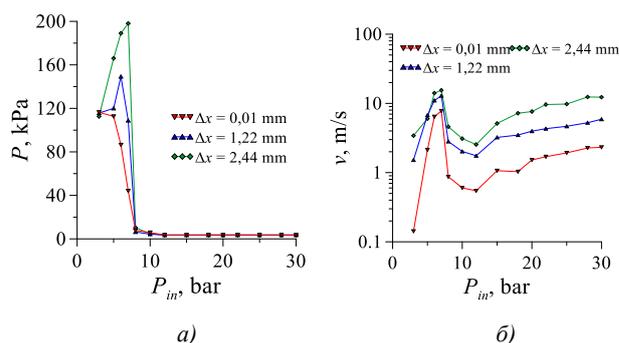


Рис. 2. Зависимости от давления на входе в систему в различных точках за цилиндром: а) давления; б) скорости

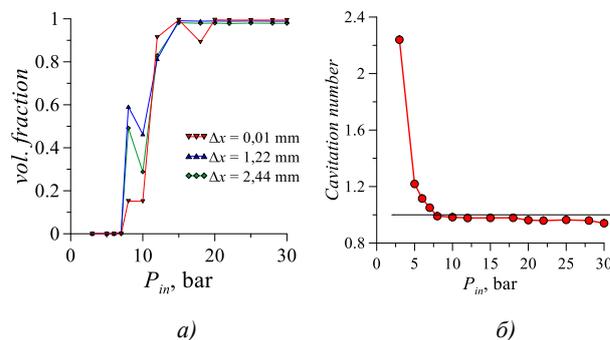


Рис. 3. Зависимости от давления на входе в систему: а) объёмной доли пара в различных точках за цилиндром; б) числа кавитации

Список литературы:

1. The stream turbine. The rede lecture. / Parsons C.A. Cambridge: at the University Press, 1911. 62 p.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10217)

УДК 532.529

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕПОДВИЖНОГО СНАРЯДА ТЕЙЛОРА ПРИ РАЗНЫХ СКОРОСТЯХ ОПУСКНОГО ПОТОКА

Лукьянов Ан.А.^{1,2}, Алексеев М.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Снарядное течение является одним из наиболее распространенных и сложных режимов течения в двухфазном потоке. Данное течение широко встречается в большинстве промышленных устройств. Особенностью снарядного режима течения является наличие в потоке пузырей газа, занимающих практически все поперечное сечение трубы. Данные пузыри обычно называют снарядами Тейлора.

В экспериментальных работах всплытие одиночного газового снаряда Тейлора в вертикальной трубе с жидкостью происходит с постоянной скоростью, которая не зависит от длины снаряда [1]: $U=0,345\sqrt{gD}$. В опускном потоке жидкости, скорость которого близка к скорости всплытия снаряда происходит режим зависания. С помощью зонда - трубки на оси симметрии был получен неподвижный снаряд Тейлора в трубе [2].

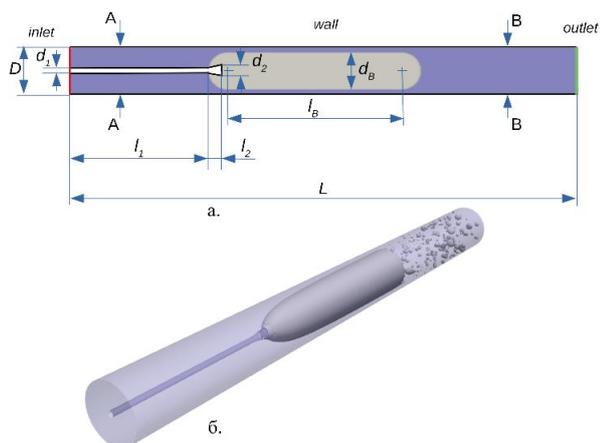


Рис.1. Схема расчетной области (а), вид расчетной области (б).

В данной работе проведено численное моделирование неподвижного газового снаряда. Геометрия расчетной области и граничные условия для численного моделирования соответствуют экспериментальной работе [2]. Рассматриваемая система состоит из круглого цилиндра длиной $L = 250$ мм, диаметром $D = 20$ мм. Внутри канала устанавливался цилиндрический зонд длиной $l_1 = 65$ мм и диаметром $d_1 = 1$ мм, который заканчивался усеченным конусом длиной $l_2 = 5$ мм и диаметром $d_2 = 2$ мм (Рис.1.а). В расчётах использовалась мультиблочная радиальная сетка со сгущением около стенки с общим числом расчетных элементов 4,2 млн.

Скорость потока жидкости менялась в зависимости от расчета от 0,15 м/с до 0,30 м/с. Уравнения Навье-Стокса решались для двух сжимаемых неизотер-

мических несмешивающихся жидкостей с использованием метода VOF. Уравнения Навье-Стокса дополнялись уравнениями модели турбулентности $k-\omega$ SST. В соответствии с экспериментом [3] моделирование проводилось для снаряда длиной 60 мм.

В работе был проведен расчет межфазной поверхности квазистационарного снаряда Тейлора при различных скоростях опускного потока. Проведено сравнение расчётной формы снаряда с экспериментом (Рис.2.), а также толщины пленки жидкости для каждого случая. Рассчитано трение на стенке вдоль всего снаряда. Показана хорошая согласованность расчетных результатов с экспериментальными данными. Рассчитан профиль модуля скорости $|U|$ построенный по радиусу канала в разных сечениях для скорости опускного потока от 0,15 м/с до 0,30 м/с.

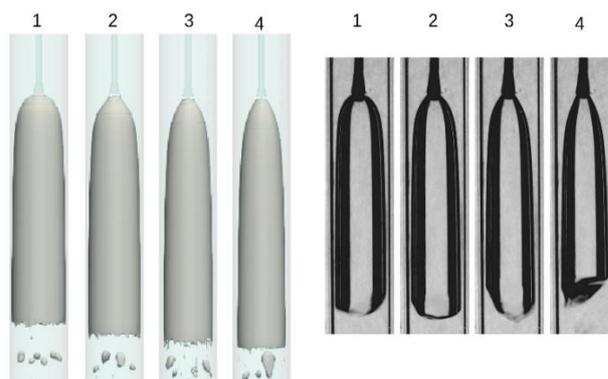


Рис.2. Форма межфазной поверхности для разных скоростей опускного потока: 1 - 0.15 м/с; 2 - 0.20 м/с; 3 - 0.25 м/с; 4 - 0.30 м/с. Слева - численное моделирование, справа – эксперимент.

Список литературы:

1. Одномерные двухфазные течения. / Уоллис Г. 1972.
2. Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д., Трение на стенке при обтекании стационарного газового снаряда опускным потоком жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т.15. № 1. С.93-98
3. Лобанов П.Д., Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок // диссертация на соискание д.т.н. 2021.

Расчеты выполнены на кластере Информационно-вычислительного центра Новосибирского государственного университета. Работа поддержана государственным контрактом Российской Федерации с Институтом Теплофизики СО РАН (121032200034-4)

УДК 622.24.063.2:544.77

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО НАНОВОЛОКНА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БУРОВЫХ РАСТВОРОВ**Лысакова Е.И.¹, Скоробогатова А.Д.¹, Минаков А.В.^{1,2}, Жигарев В.А.¹**¹ Сибирский федеральный университет,

660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящее время нефтегазовая промышленность сталкивается с рядом проблем, связанных с использованием материалами при строительстве и разработке скважин из-за значительных изменений физических, химических и теплофизических условий более глубоких горизонтов, а также все более строгих экологических норм [1]. Одним из возможных и перспективных способов решения этих проблем является использование нанотехнологий [2]. На сегодняшний день имеется достаточно большое количество лабораторных исследований, в которых показано, что небольшие добавки наночастиц могут значительно менять реологические свойства буровых растворов [3]. Наночастицы могут вызвать такое изменение свойств раствора, которое обеспечит стабильность ствола скважины в сланцевых пластах и уменьшит воздействие на окружающую среду, исключив использование стандартных токсичных химических реагентов в буровом растворе [4]. Это подчеркивает огромный потенциал наноматериалов в разработке интеллектуальных систем промысловых жидкостей для преодоления текущих, а также будущих проблем бурения и добычи.

В данной работе было исследовано влияние нановолокон оксида алюминия на реологические свойства буровой эмульсии. ANF (нановолокна Al_2O_3) представляет собой материал кристаллического нановолокна, обладающий сверхвысокой механической прочностью и стабильностью. С физико-химической точки зрения материал представляет собой нановолокна из оксида алюминия с однонаправленной диспергированной структурой и граненой поверхностью. Такие характеристики обеспечивают ANF широкий спектр возможностей для взаимодействия с различными полимерными матрицами, а также с керамическими и металлическими материалами. Проведенные исследования по влиянию добавок нановолокон оксида алюминия на свойства буровых растворов на углеводородной основе продемонстрировали положительные результаты.

Базовый буровой раствор на углеводородной основе представляет собой обратную эмульсию. Раствор приготавливался с соблюдением временных интервалов и пропорций каждого добавляемого реагента. Детально методика приготовления буровой эмульсии на углеводородной основе описана в работе [5]. Концентрацию нановолокон в буровых растворах варьировали от 0,25 до 2 мас. %.

Реологические свойства промысловой жидкости исследованы на ротационном вискозиметре Ofite 900, работающем в широком диапазоне скоростей сдвига. Доверительный интервал погрешности результата измерений не превышал 2%. Микрореология образцов исследовалась с помощью Rheolaser MASTER™.

Rheolaser использует микрореологические принципы для исследования вязкоупругих образцов, основанные на методе диффузионной волновой спектроскопии.

В ходе исследований показано, что добавление нановолокон значительно влияет на реологические характеристики буровых растворов. Эффективная вязкость, динамическое напряжение сдвига и мера консистенции возрастают практически в два раза с увеличением концентрации нановолокон до 2 мас. %. При этом влияние нановолокон на реологические характеристики буровых растворов также оказывается в разы сильнее по сравнению со сферическими наночастицами. По этой причине применение нановолокон оксида алюминия для управления реологией буровых растворов представляется чрезвычайно перспективным. Исследование упругих свойств буровых растворов с добавкой ANF показало, что при концентрациях добавок выше 0,5 мас. % прочность геля резко возрастает. Это свидетельствует о том, что при таких концентрациях нановолокон в растворах происходят процессы структурообразования, связанные с процессами перколяции волокон. Исследование микрореологии образцов буровых растворов, модифицированных нановолокнами, позволило изучить данные их структурообразования. Показано, что добавка нановолокон позволяет значительно сократить время набора структуры буровых растворов на углеводородной основе.

Таким образом, было показано, что в диапазоне концентраций, не превышающем 1 мас. %, нановолокна значительно меняют реологические характеристики буровых растворов, не ухудшая значительно их коллоидную устойчивость. Это делает данный материал перспективным для применения при разработке буровых растворов.

Список литературы:

1. Kong X., Ohadi M.M. Applications of micro and nano technologies in the oil and gas industry – an overview of the recent progress // SPE. 2010. 138241–M.
2. Наножидкости и умные жидкости в технологиях разработки нефтегазовых месторождений / Евдокимов И.Н. М: Недра, 2016. 247 с.
3. Минаков А.В., Михиенкова Е.И., Жигарев В.А., Неверов А.Л., Рудяк В.Я. Исследование влияния добавки наночастиц на свойства буровых растворов // Коллоидный журнал. 2018. Т.80. №4. С. 418–426.
4. Ismail A.R., Rashid N.M., Jaafar M.Z., Sulaiman W.R.W., Buang N.A. Effect of nanomaterial on the rheology of drilling fluids // Research Journal of Applied Sciences. 2014. V.14. P.1192–1197.
5. Mikhienkova E.I., Lysakov S.V., Neverov A.L., Zhigarev V.A., Minakov A.V. Experimental study on the influence of nanoparticles on oil-based drilling fluid properties. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. V.208. 109452.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
Российского научного фонда
в рамках проекта № 23-79-30022*

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ ПАРОВОДЯНОЙ СРЕДЫ ЧЕРЕЗ ПОГРУЖЕННЫЙ ДЫРЧАТЫЙ ЛИСТ

Мелихов В.И., Никулин А.С.

Национальный исследовательский университет "МЭИ",
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

Горизонтальные парогенераторы (ПГ), предназначенные для отвода тепла от теплоносителя первого контура и генерации сухого насыщенного пара, являются важным оборудованием атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами [1, 2]. Одним из основных факторов, определяющих приемлемость параметров ПГ, является качество генерируемого пара, которое зависит в первую очередь от конструктивных особенностей и сепарационных устройств ПГ. Внутриконтурные устройства ПГ включают в себя погруженные дырчатые листы (ПДЛ), предназначенные для выравнивания паровой нагрузки на зеркале испарения [3]. Одним из наиболее важных параметров ПДЛ является гидравлическое сопротивление. В случае чрезмерно высокого сопротивления ПДЛ может произойти выброс пароводяной смеси из-под листа в сливной канал. При слишком низком сопротивлении ПДЛ действует неравномерно, т.е. вода стекает с ПДЛ вниз через часть отверстий. Таким образом, необходимо знать значение коэффициента гидравлического сопротивления ПДЛ с высокой точностью.

В данной работе код FlowVision используется для моделирования пароводяного потока через отверстие ПДЛ в условиях экспериментов по исследованию гидравлического сопротивления ПДЛ. На первом этапе было рассмотрено течение насыщенного пара в одной периодической ячейке ПДЛ. Геометрия расчетной области соответствовала степени перфорации ПДЛ 5,7%. Скорость потока на входе в расчетную область составляет 0,273 м/с, давление насыщенного пара 7 МПа, плотность и динамическая вязкость имеют значения 36,5 кг/м³ и 1,9·10⁻⁵ Па·с, соответственно. Указанные выше параметры соответствовали условиям экспериментов на стенде ПГВ [4-6].

Было выполнено исследование влияния расчетной сетки и моделей турбулентности на решение. В качестве сравнительных параметров рассматривались перепад давления, возникающий при течении пара сквозь отверстие, и максимальная скорость пара в отверстии. Расчеты проводились на сетках, содержащих 216 тыс., 245 тыс., 309 тыс. и 770 тыс. контрольных объемов, соответственно. Использовались четыре модели турбулентности k-eps, k-epsFV, KENL и SST. Полученные на самой детальной сетке результаты по перепадам давления были сопоставлялись со значением $\Delta P_{\text{Идельчик}} = 980$ Па, определенным с помощью полуэмпирической корреляции для коэффициента гидравлического сопротивления [7]. Был сделан вывод, что использование модели турбулентности SST дает наиболее точный результат с погрешностью менее 3%.

Следующим этапом моделирования стало исследование влияния степени перфорации на перепад давления и максимальную скорость, для этого были построены расчетные области, соответствующие степеням перфорации 4,3% и 8,1%, соответственно. Все остальные геометрические и теплофизические параметры остаются прежними. Основываясь на выполненных исследованиях в качестве модели, турбулентности была выбрана модель SST. Подход к построению сеточных моделей для этих двух расчетных областей соответствовал методике построения сетки в 309 тыс. Качественная картина течения сквозь узкое отверстие осталась прежней, однако на количественные параметры существенное влияние оказывает степень перфорации ПДЛ. При увеличении степени перфорации с 4,3% до 8,1% перепад давления снижается примерно в 4 раза, а максимальное значение скорости в 2 раза. Наблюдается очень хорошее совпадение величин коэффициентов теоретического значения гидравлического сопротивления с расчетным значением, относительная погрешность составляет 0,13–2,79 %.

Дальнейшее исследование будут продолжены по двум направлениям: 1) созданная расчетная модель будет использоваться как элемент более сложной расчетной схемы течения среды парогенераторе, 2) будет изучаться влияние наличия влаги в паре на коэффициент гидравлического сопротивления.

Список литературы:

1. Лукасевич Б. И. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций / Лукасевич Б.И., Н. Б. Трунов, Ю. Г. Драгунов, С. Е. Давиденко. М.: ИКЦ «Академкнига». 2004. 391 с.
2. Papp L., Vacek J. WWER steam generators. In: Steam Generators for Nuclear Power Plants. Ed. J. Rizic., 1st Edition, Woodhead Publishing Series in Energy. 2017. pp. 107-124.
3. Трунов Н. Б. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР / Н. Б. Трунов, С. А. Логвинов, Ю. Г. Драгунов. М.: Энергоатомиздат. 2001. 316 с.
4. Блинков В.Н., Елкин И.В., Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Неровнов А.А., Никонов С.М., Парфенов Ю.В. Влияние объемного паросодержания на гидравлическое сопротивление погруженного дырчатого листа // Теплоэнергетика. 2015. №7. С. 24–29.
5. Блинков В.Н., Елкин И.В., Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Неровнов А.А., Никонов С.М., Парфенов Ю.В. Влияние неравномерной перфорации погруженного дырчатого листа на выравнивание паровой нагрузки на зеркале испарения парогенератора ВВЭР // Теплоэнергетика. 2016. №1. С. 54–58.
6. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Неровнов А.А., Никонов С.М. Исследование закономерностей течения пароводяной смеси через отверстия погруженного дырчатого листа при высоких паросодержаниях // Теплоэнергетика. 2018. №1. С. 54–60.
7. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. / Идельчик И.Е. М.: Машиностроение. 1992. 672с.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-19-00793,
<https://rscf.ru/project/22-19-00793/>*

УДК 536.423

РАСЧЕТ СТАЦИОНАРНОЙ ВОЛНЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕТОНАЦИИ В МНОГОФАЗНОЙ СИСТЕМЕ «КАПЛИ ВОДЫ, ОКРУЖЕННЫЙ ПАРОВЫМИ ОБОЛОЧКАМИ, В СПЛОШНОМ РАСПЛАВЛЕННОМ СВИНЦЕ»

Мелихов О.И., Салех Башар

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

Разрыв теплообменной трубки в парогенераторе энергетического реактора со свинцовым или свинцово-висмутовым жидким теплоносителем приводит к тому, что вода, находящаяся в теплообменной трубке под высоким давлением (~ 18-20 МПа) будет вытекать в межтрубное пространство, заполненное расплавленным свинцом при низком давлении. В этих условиях истечение воды будет происходить в критическом режиме. В результате может образоваться смесь жидкого свинца, водяного пара и жидкой воды, при этом вода будет находиться в виде отдельных капель, окруженных паровыми оболочками, а жидкий свинец будет представлять собой несущую среду [1].

В такой образовавшейся многофазной системе может осуществиться быстрый переход тепловой энергии высокотемпературного расплава в механическую энергию движения многофазной среды по детонационному механизму (паровой взрыв) [2]. При этом в ударной волне происходит дробление капель воды на мелкие фрагменты, приводящее к резкому увеличению площади поверхности теплообмена между расплавом и водой, что обеспечивает энергетическую подпитку распространения волны термической детонации. Данное явление может представлять собой угрозу целостности внутренних конструкций реакторной установки и поэтому требует детального изучения.

В настоящей работе на основе методов механики многофазных систем предложена модель стационарной волны термической детонации, которая распространяется в смеси капель воды, окруженных паровыми оболочками, находящимися в расплавленном свинце.

Скорость детонационной волны определяется путем построения адиабаты Гюгонио. Предполагается установление теплового и скоростного равновесия продуктов термической детонации. Адиабата Гюгонио представляет собой на плоскости «удельный объем многофазной смеси – давление смеси» описывающую конечные состояния равновесной смеси. Для её построения задавались последовательно возрастающие значения давления и по уравнению Гюгонио

$$(P - P_0)(v - v_0) - 2(h - h_0) = 0,$$

где P , v , h – давление, удельный объем и энтальпия смеси в точке на адиабате Гюгонио, а нижним индексом 0 отмечены эти же величины в исходной смеси, определялись значения удельного объема смеси. При решении уравнения Гюгонио используются уравнения состояния воды и свинца.

Для дальнейшего исследования использовалась точка Чепмена-Жуге на адиабате Гюгонио, которая определялась точкой касания адиабаты прямой, исхо-

дящей из точки, изображающей исходную многофазную смесь (прямая Рэлея-Михельсона). Именно эта точка описывает ту волну детонации, которая будет реализовываться [3].

Следующий этап расчета заключается в определении значений параметров на лидирующей ударной волне. Делается предположение о постоянстве температуры расплава при прохождении ударной волны, что объясняется относительной медленностью температурной волны в расплаве.

Для определения значений параметров на ударной волне решается система нелинейных уравнений, которая включает уравнения сохранения потоков масс жидкого свинца и воды на ударной волне, уравнение сохранения потока импульса многофазной смеси на ударной волне и уравнения сохранения энергий фаз на ударной волне. Система нелинейных уравнений решалась методом итераций Ньютона, основанным на разложении в ряд Тейлора относительно приближенных решений. В результате определялись значения давления, скоростей и объемных долей фаз и температуры воды на ударной волне. Эти значения использовались в качестве граничных условий при решении уравнений, описывающих структуру волны детонации.

Описание процессов межфазного взаимодействия после прохождения ударной волны осуществлялось на основе стационарных уравнений механики многофазных систем. Межфазные теплообмен и трение моделировались с помощью полуэмпирических корреляций, описанных в [4]. Описание дробления капель воды основывалось на модели обдирки пограничного слоя с помощью корреляции [5].

С помощью описанной модели были выполнены параметрические расчеты волн детонации в исследуемых системах, позволившие получить их основные характеристики.

Список литературы:

1. Безносос А.В., Пинаев С.С., Давыдов Д.В., Молодцов А.А., Боккова Т.А., Мартынов П.Н., Рачков В.И. Экспериментальные исследования характеристик контактного теплообмена свинцовый теплоноситель-рабочее тело // Атомная энергия. 2005. Т. 98. № 3. С. 182-187.
2. Dinh T.N. Multiphase flow phenomena of steam generator tube rupture in a lead-cooled reactor system: a scoping analysis // Proceedings of ICAPP 2007. Paper No. 7497. May 13-18, 2007. Nice, France.
3. Теория детонации / Зельдович Я.Б., Компанец А.С. М.: Гостехиздат, 1955. 268 с.
4. Fletcher D.F. An improved mathematical model of melt/water detonations – I. Model formulation and example results // Int. J. Heat Mass Transfer. 1991. V. 34. No. 10. P.2435-2448
5. Carachalios C., Burger M., Unger H. A transient two-phase model to describe thermal detonations based on hydrodynamic fragmentation // Proc. Int. Meeting on LWR Severe Accident Evaluation. Cambridge, Massachusetts, 28 Aug.-1 Sep. 1983.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 21-19-00709*

УДК 532.5

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРО- И НАНОФЛЮИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ИНДУСТРИИ**Минаков А.В.^{1,2}, Жигарев В.А.¹, Гузей Д.В.^{1,2},
Пряжников А.И.¹, Иванова С.В.¹, Пряжников М.И.¹, Лысакова Е.И.¹**¹ Сибирский федеральный университет,

660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Нефтегазовая индустрия является одной из важнейших отраслей экономики России. В нынешних политических и экономических условиях нефтегазовая отрасль России переживает сложные времена. Новые экономические реалии требуют создания отечественных принципиально новых высокоэффективных технологий разработки месторождений углеводородов. Одним из возможных и перспективных способов решения этих задач может стать использование микро и нанотехнологий. В данном проекте будут выполнены систематические исследования возможностей применения микро и нанотехнологий в задачах разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений. Использование микро и нанотехнологий в задачах разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений призвано повысить эффективность существующих технологий добычи углеводородного сырья. Фундаментальной научной проблемой является комплексное изучение многофазных сред и потоков в каналах и пористых средах, применительно к задачам разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, а также создание новых методик численного моделирования и методологии лабораторного эксперимента, основанного на нанотехнологиях.

Направления, в которых используются наножидкости:

а) Применение наносuspensions и наномulsion для увеличения нефтеотдачи пластов, особенность таких технологий состоит в том, что размер изучаемых частиц соизмерим с радиусом действия сил межфазного взаимодействия, который как раз важен для процессов вытеснения нефти с помощью наноразмерных объектов. К нанотехнологиям также относятся технологии регулирования смачиваемости [1]. Сейчас в задачах повышения нефтеотдачи (МУН) активно исследуется применение наносuspensions (или наножидкостей) [2]. Было показано, что добавление наночастиц в вытесняющую жидкость может значительно повысить коэффициент извлечения нефти.

б) Применение наносuspensions для улучшения свойств буровых растворов, современные буровые растворы имеют много различных свойств, на которые в той или иной степени могут влиять добавки наночастиц. Наножидкости стали использоваться для управления реологическими свойствами и контроля процесса фильтрации бурового раствора, для снижения коэффициента трения буровой трубы и стенок скважины и предотвращения таких явлений, как прихват буровой колонны. В ряде работ показано, что

благодаря добавке наночастиц можно значительно улучшить свойства буровых растворов.

в) Использование нанотехнологий в процессах ГРП, добавка наночастиц в жидкости ГРП не только приводит к закупориванию субмикронных пор, но и приводит к формированию на поверхности породы плохо проницаемой фильтрационной корки [3]. В результате чего было показано, что в ряде случаев добавка наночастиц в жидкости ГРП может приводить к снижению фильтрационных потерь в несколько раз по сравнению с обычными микрокольматами. При этом применение добавок наночастиц для этих целей считается наиболее целесообразным для низкопроницаемых сланцевых пород с размерами пор (10 нм - 1000 нм) [4].

Микрофлюидные технологии включают в себя создание и применение микрочипов для изучения нефтевытеснения. Традиционным способом изучения методов увеличения нефтеотдачи является лабораторное заводнение образцов керна горных пород, которое дает информацию о кинетике и количестве извлеченной нефти. Однако этот способ имеет ряд недостатков: сложность и длительность проведения испытаний; отсутствие наблюдения за механизмом и явлениями, происходящими на микроуровне пор; воспроизводимость результатов. Для изучения методов увеличения нефтеотдачи стали активно применяться микрофлюидные чипы, модели пористых сред, имитирующих горные породы [5].

Список литературы:

1. Киреев В. Нанотехнологии: история возникновения и развития // Наноиндустрия. 2008. № 2. С. 2-10.
2. AfzaliTabar M., Rashidi A., Alaei M., Koolivand H., Pourhashem S., Askari S. Hybrid of quantum dots for interfacial tension reduction and reservoir alteration wettability for enhanced oil recovery (EOR) // J. Mol. Liq. 2020. V.307, P.1-14.
3. Fakoya M. F., Shah S. N. Enhancement of Filtration Properties in Surfactant-Based and Polymeric Fluids by Nanoparticles Hybrid of quantum dots for interfacial tension reduction and reservoir alteration wettability for enhanced oil recovery (EOR). // SPE 2014. SPE-171029-MS
4. Barati R. Application of nanoparticles as fluid loss control additives for hydraulic fracturing of tight and ultra-tight hydrocarbon-bearing formations. // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2015. V.27 № 3, P.1321-1327.
5. Bazazi P., Sanati-Nezhad A., Hejazi S. H. Role of chemical additives on water-based heavy oil mobilization: A microfluidic approach. // Fuel 2019. V.241, P.1195-1202.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
Российского научного фонда в рамках проекта
№ 23-79-30022 <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>*

УДК 533.6.011.5

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛН С ГАЗОПРОНИЦАЕМЫМИ
ВЫСОКОПОРИСТЫМИ МАТЕРИАЛАМИ****Миронов С.Г., Кириловский С.В., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С.**Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4

Изучение взаимодействия ударных волн (УВ) малой интенсивности с газопроницаемыми пористыми материалами представляет значительный практический интерес. Применение покрытий, поглощающих энергию ударных волн и снижающих величину их отражения, позволяет снизить опасность детонации смесей горючих дисперсных частиц или взрывоопасных газов с воздухом, зачастую возникающих в ряде технологических процессов. В частности, в защите от проникновения ударных волн нуждаются каналы системы вентиляции и транспортные коридоры промышленных зданий. Значительную опасность детонации создает фокусировка слабых ударных волн при их падении на области с наклонными поверхностями, когда результирующая интенсивность ударных волн превосходит порог начала детонации. Большое место среди элементов защиты занимают газопроницаемые пористые покрытия, такие как перфорированные листы, пакеты плетеных сеток и высокопористые ячеистые материалы [1, 2]. При взаимодействии с ними и распространении ударных волн в подобных материалах снижается коэффициент отражения, уменьшается их амплитуда и происходит трансформация волновых профилей.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального и численного моделирования взаимодействия слабых УВ (число Маха 1,25 – 3) при их падении на нормально расположенные преграды, выполненные из газопроницаемых высокопористых ячеистых (ВПЯМ), решетчатых распорного типа и сетчатых материалов. Эксперименты выполнены в двухметровой ударной трубе, в которых регистрировались временные зависимости статического давления в точке над поверхностью пористого материала, установленного в области задней стенки ударной трубы. Численное моделирование распространения и взаимодействия УВ с материалами проводилось с помощью пакета ANSYS Fluent. В расчетах газопроницаемые высокопористые материалы моделировались в рамках тороидальной модели ВПЯМ, которая хорошо себя зарекомендовала в задачах сверхзвукового обтекания цилиндрических моделей с передними газопроницаемыми пористыми вставками [3]. Результаты расчетов сопоставлялись с данными измерений. Основной задачей численного моделирования было получение данных о полях давления и скорости в пористом материале, определение которых в эксперименте невозможно. В работе проводились параметрические исследования влияния структуры (в частности, размера ячеек и величины пористости), толщины пористых материалов, а также расстояния от пористой вставки до задней стенки ударной трубы, на параметры отраженных волн. Конечной целью исследований являлся

поиск оптимальной пространственной структуры газопроницаемых высокопористых материалов, обеспечивающей минимизацию интенсивности отраженных УВ.

На рис. 1а приведен пример расчета изменения от времени статического давления над поверхностью вставки толщиной 20 мм из ВПЯМ с пористостью 95 % и диаметром пор 1 мм, расположенной на расстоянии 50 мм от задней стенки ударной трубы. На рис. 1б приведены данные измерений для вставки толщиной 70 мм из решетчатого материала с пористостью 97,5 % и диаметром распорных балок 0,3 мм, расположенной на расстоянии 30 мм от задней стенки ударной трубы. Эксперименты и расчеты показали

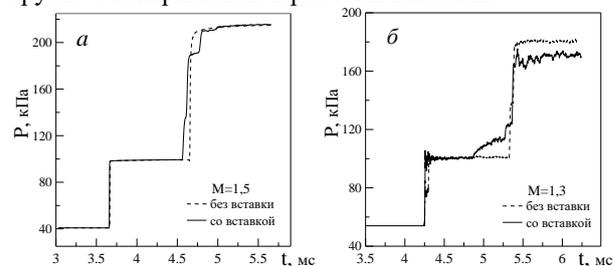


Рис. 1.

уменьшение временного градиента статического давления в отраженной волне, соответствующей на графиках второму повышению давления, и снижение ее абсолютной величины при взаимодействии с высокопористыми материалами. Исследования также показали, что перспективным направлением поиска является использование газопроницаемых материалов с неоднородным распределением параметров пористости по толщине вставки, в частности размера ячеек пространственной структуры и величины пористости.

Список литературы:

1. Кочетков А.В., Романов В.И., Ходыкина И.А. Моделирование взаимодействия ударных волн с пористыми газопроницаемыми пакетами металлических сеток. Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4 (4). С. 1546–1548.
2. Ram O., Sadot O. Analysis of the pressure buildup behind rigid porous media impinged by shock waves in time and frequency domains // J. Fluid Mech. 2015. V. 779. P. 842-858.
3. Кириловский С.В., Поплавская Т.В., Миронов С.Г. и др. Трехмерные скелетные модели газопроницаемых высокопористых ячеистых материалов для сверхзвуковой аэродинамики // Теплофизика и Аэромеханика. 2022. Т. 29, № 5. С. 741-752.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021-2023 годы, проект "Исследование физических проблем управления равновесными и неравновесными газовыми течениями" (№ 121030500162-7)

УДК 536.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ПОТОКЕ В КАНАЛЕ ПОСЛЕ ЕГО ВНЕЗАПНОГО СУЖЕНИЯ

Пахомов М.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Одними из наиболее эффективных методов увеличения теплопереноса являются использование пассивных интенсификаторов теплообмена, расположенных на поверхностях и имеющих различные выступы и (или) углубления [1,2]. Важным вопросом является исследование влияния выступов различной формы, установленных на поверхности канала или трубы на структуру течения и теплообмен. Другим известным способом интенсификации теплопереноса является испарение капель различных жидкостей, распыленных в газовых турбулентных потоках, в том числе при наличии отрыва потока [3].

Ранее были проведены экспериментальные и численные исследования испарения распыленных мелкодисперсных капель жидкости в потоках после внезапного расширения канала [3, 4]. В этих работах показано, что использование скрытой теплоты фазового перехода приводит к заметному росту теплопереноса (в несколько раз в сравнении с однофазным потоком при прочих идентичных условиях) в сравнении с однофазным потоком. Ранее авторами настоящей работы проведены подробные численные исследования структуры течения, турбулентности и теплообмена в отрывных газодисперсных течениях после плоского обратного уступа [4]. Автору неизвестны работы, посвященные изучению обтекания газодисперсным потоком уступ со встречной ступенькой. Целью данной работы является численное исследование влияния внезапного сужения плоского канала на локальную структуру турбулентного потока, турбулентность и теплообмен в отрывном газодисперсном потоке при наличии испарения капель.

В работе рассмотрена задача о динамике двухфазного газодисперсного отрывного турбулентного потока при наличии межфазного теплообмена при обтекании уступа, расположенного ступенькой вперед (forward-facing step). При решении используются двумерные RANS уравнения, записанные с учетом обратного влияния частиц на процессы переноса в газе [4]. Для описания динамики течения и теплопереноса в газовой и дисперсной фазах используется эйлеров континуальный подход. Турбулентность несущей фазы описывалась с использованием модели переноса компонент рейнольдсовых напряжений [5], записанной с учетом двухфазности потока.

Поперечные распределения кинетической энергии турбулентности (КЭТ) несущей фазы для двумерного газодисперсного течения в шести сечениях до и после уступа, расположенного ступенькой вперед, показывают наибольшее значение величины КЭТ в слое смешения (см. рис. 1). Распределения КЭТ несущей (тонкие непрерывные линии) и дисперсной (пунктир) фаз в газодисперсном потоке имеет подобный вид таковому

для однофазного течения (непрерывная линия). Максимальное значение турбулентности газовой фазы получено в слое смешения и при $x/h \approx 2$. Турбулициация течения в этом сечении связана с отрывным обтеканием потоком встречной ступеньки. Отметим, что наблюдается подавление уровня турбулентности газовой фазы при добавлении в поток испаряющихся капель воды (до 15%). Турбулентная энергия капель воды меньше соответствующего значения для газовой фазы на всей длине расчетной области, но также имеет свой максимум в области $x/h = 1-2$. Это говорит о вовлечении капель жидкости в движение газа и их взаимодействие с турбулентными вихрями газовой фазы.

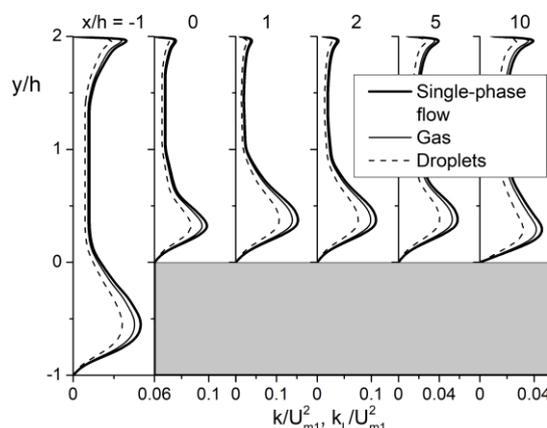


Рис. 1. Профили турбулентной кинетической энергии, в однофазном потоке ($ML1 = 0$), несущей и дисперсной фазах в газодисперсном потоке при $ML1 = 0.05$. $ReH = 2 \times 10^4$, $Re = 6.7 \times 10^3$, $d1 = 20$ мкм, $Stk = 0.06$.

Список литературы:

1. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена. Казань: Изд-во Центра инновационных технологий, 2009. 531 с.
2. Terekhov V., Dyachenko A., Smulsky, Ya., Bogatko T., Yarygina N. Heat transfer in subsonic separated flows. Springer. Cham, 2022.
3. Hishida K., Nagayasu T., Maeda M. // Augmentation of convective heat transfer by an effective utilization of droplet inertia, Int. J. Heat Mass Transfer. 1995. V. 38. P. 1773–1785.
4. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Droplet evaporation in a gas-droplet mist dilute turbulent flow behind a backward-facing step // Water. 2021. V. 13. Paper 2333.
5. Fadai-Ghotbi A., Manceau R., Boree J. Revisiting URANS computations of the backward-facing step flow using second moment closures. Influence of the numerics // Flow, Turbulence Combust. 2008. V. 81. |P. 395–410.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-19-00162

УДК 532.593

ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В СМЕСЯХ CH₄/AIR, CH₄/AIR/УГОЛЬ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗАКРЫТОМ КАНАЛЕ**Пинаев А.В., Пинаев П.А.**Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

При угледобыче происходят залповые выбросы сжатого угольного газа, содержащего преимущественно метан. После перемешивания его с воздухом возможно воспламенение смеси, формирование волны горения (ВГ), подъём потоком газа угольной пыли и распространение пламени по газо-угольной взвеси.

В [1, 2] исследованы волны горения, взрывные и детонационные волны во взвесьях угля в смесях CH₄/Air и CH₄/O₂, в [3-7] исследованы также ВГ во взвесьях CH₄/Air/уголь.

Зона реакции в ВГ и горячие продукты горения легче окружающего газа. В вертикальном закрытом канале после инициирования ВГ сверху пламя распространяется вниз, продукты горения стремятся всплыть вверх, возникают колебания пламени. Авторам не известны работы, в которых бы детально изучали такой процесс. В [8] лишь сообщается, что скорость распространения ВГ вверх по трубе (при поджигании газовой смеси снизу) больше, чем скорость распространения ВГ вниз (при поджигании смеси сверху). Целью работы является экспериментальное исследование волн горения в смесях метан/воздух и метан/воздух/взвесь угля в вертикальном закрытом канале (длина 6,75 м, диаметр 70 мм, при давлении 0,1 МПа).

Исследованы: стехиометрическая смесь CH₄+9,524Air (9,5% об. метана), бедная по горючему смесь 0,07CH₄+0,93Air (коэффициент избытка воздуха h_{Air} ≈ 39,5%) и смеси (0,07CH₄+0,93Air)/угольная взвесь. Стехиометрические смеси с углеродом и углем (в угле 78,4% С): 0,07CH₄+0,93Air+0,79C и 0,07CH₄+0,93Air+1,01Coal (стехиометрическая масса угля в ударной трубе m_{st} ≈ 0,93 г, ρ_{st} ≈ 35,6 г/м³).

Инициирование смесей осуществляли искрой. В работе получены данные о профилях давления, интенсивности свечения в волнах горения, скорости распространения ВГ по длине трубы. На начальном участке трубы наибольшая скорость ВГ $D \approx 30$ м/с. В конце трубы скорость ВГ во всех смесях уменьшается до значений $D \approx 2-3$ м/с.

С помощью видеокамеры во всех исследованных смесях обнаружено сложное возвратно-поступательное движение пламени (колебания) со знакопеременной скоростью.

В гетерогенных смесях CH₄/Air/Уголь яркость пламени возрастает примерно на 2 порядка по сравнению с волной горения в газовых смесях. Горение угольных

частиц повышает энерговыделение, но слабо влияет на скорость ВГ. В исследованных смесях усреднённая скорость пламени по длине трубы уменьшается от нескольких десятков м/с до значений около 1 м/с.

Оптическая съёмка пламени показала, что волны горения в смеси 7%CH₄+93%Air, распространяясь вниз, периодически меняют направление движения с частотой $f \approx 32-36$ Гц. Мгновенные значения скорости фронта пламени по длине щели находятся в диапазоне от +14 м/с до -10 м/с. Максимальные положительные скорости пламени больше, чем отрицательные, усреднённая по длине щели скорость пламени $\bar{V} \approx +(0,5-2)$ м/с. Фронт пламени неровный, протяжённость светящейся области пламени 5-20 см.

В смесях (7%CH₄+93%Air)/Уголь на фронте пламени различаются неоднородные струи, протяжённость светящейся области ВГ 20-30 см, и она изменяется во времени, свечение пламени неоднородно. Мгновенные скорости ВГ изменяются от +45 м/с до -12 м/с, средняя скорость пламени в оптической секции $\bar{V} \approx +(1,5-2)$ м/с, частота колебаний пламени $f \approx 36-40$ Гц.

Список литературы:

1. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Изучение сравнительной химической активности метана и взвесей частиц угля при горении, взрывах и детонации // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2019. № 4. С. 5-16.
2. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Волны горения и детонации в смесях газов CH₄/Air, CH₄/O₂, O₂ с взвесьями каменного угля // ФГВ. 2020. Т. 56. № 6. С. 56-68.
3. Пинаев А.В., Пинаев П.А. Детонационные волны в системах метан/водород/кислород/взвесь угля // ФГВ. 2022. Т. 58. № 4. С. 91-96.
4. Yihui Niu, Leilin Zhang, Biming Shi, Qianyi Yang & Zhen Zhong. Methane–Coal Dust Mixed Explosion in Transversal Pipe Networks // Combustion Science and Technology. 2021. V. 193. No. 10. P. 1734-1746.
5. Деметьев А.А., Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Палеев Д.Ю. Сопоставление результатов моделирования распространения пламени в гибридной газозвеси с экспериментальными данными // ИФЖ. 2016. Т.89. №6. С. 1538–1546.
6. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Моделирование искрового зажигания бидисперсной аэрозвеси угольной пыли // ИФЖ 2018. Т.91. №5. С. 1328 – 1334.
7. Моисеева К.М., Пинаев А.В., Васильев А.А., Крайнов А.Ю., Пинаев П.А. Исследование горения углеметановоздушной взвеси в длинном закрытом канале // ФГВ. 2022. Т. 58. № 5. С. 54-63.
8. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах / М.: Мир. 1968. 592 с.

УДК 532.5

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ МИКРОГЕЛЯ С ГИДРОФОБНОЙ И ГИДРОФИЛЬНОЙ НАНОВОЛОКНИСТЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ЧИСЛА ВЕБЕРА**Пискунов М.В., Пискунова А.Е., Хомутов Н.А.**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

На сегодняшний день воздушная микрофлюидика стала удобной технологией производства капель и частиц различных форм и размеров [1]. С использованием биополимеров микрофлюидика позволяет развивать новые и уже известные практические приложения и технологии: безопасный транспорт лекарственных веществ и живых клеток, биопроизводство тканей, одноэтапное производство трехмерных биоматериалов, наполненных живыми клетками [2, 3]. В последнее время интенсивно развивается направление с воздушным взаимодействием исходных потоков микроструй и микрокапель с последующим гелеобразованием путем ионного сшивания. Однако, результатов исследований гидродинамического взаимодействия сложных инкапсулированных частиц с поверхностью, сопряженного с процессами термоотверждения, теплообмена и упругих деформаций пока еще очень мало. Как правило, исследователи в области динамики жидкости при ударе капли о стенку не затрагивают влияние физико-механических свойств, которые начинают проявляться, например, при отверждении полимеров, на параметры растекания, осаждения и деформации. Интерес также представляет исследование процесса взаимодействия частиц с поверхностями, обладающими различной смачиваемостью, например, гидрофобностью и гидрофильностью. Таким образом, наблюдается большой пробел в исследованиях в области взаимодействия микроразмерных частиц микрогеля с твердыми поверхностями. Очень мало информации доступно о влиянии реологических свойств частиц микрогеля, а также свойств поверхности, таких как смачиваемость и шероховатость, на динамику деформации частиц при соударении с поверхностью. Целью данной работы является экспериментальное исследование взаимодействия частиц микрогеля с гидрофобной и гидрофильной нановолокнистыми поверхностями при варьировании числа Вебера.

Формирование потока частиц микрогеля осуществляется методом ионного сшивания при взаимодействии двух потоков – микрокапельного потока альгината натрия и микроструйного потока хлорида кальция с добавлением 10% этилового спирта. Для этого спроектирован и распечатан на 3D принтере каркас с необходимыми технологическими отверстиями. С помощью внешнего вибрационного воздействия формируется структура «бусины-на-нити» с контролируемыми геометрическими размерами составляющих элементов. При варьировании концентрации альгината натрия получены четыре образца микрогеля G1-G4, обладающие различными свойствами: степенью гелеобразования, вязкостью, плотностью и поверхностным натяжением.

Гидродинамическое поведение формируемых микроструктур исследовано при взаимодействиях частицы микрогеля с целевой поверхностью. В качестве

поверхности взаимодействия используются два вида нановолокна с гидрофобными и гидрофильными свойствами. Для обеих поверхностей измерен статический краевой угол смачивания с использованием воды и частиц микрогеля. С помощью атомно-силовой микроскопии определена средняя шероховатость поверхности, а с помощью сканирующего электронного микроскопа измерены диаметр волокна и пористость поверхности.

Для анализа результатов экспериментального исследования рассчитаны безразмерные параметры: числа Рейнольдса (Re), Вебера (We), Деборы (De) и степень гелеобразования (χ). Варьирование числа We проводится за счет изменения расстояния между целевой стенкой и генерирующими потоки рабочих жидкостей соплами и расходов этих потоков.

Исследуется максимальное растекание частиц микрогеля, определяемое числами Re и We . Выявлено, что увеличение вклада сил поверхностного натяжения в значения We , выраженное снижением последних, способствует заметному увеличению смачиваемости поверхности взаимодействия при растекании за счет инерции. В свою очередь, влияние фактора числа Re заключается в снижении максимального диаметра растекания при увеличении вязкости микрогеля. Установлена определяющая роль факторов степени гелеобразования и безразмерной шероховатости поверхности в предопределении последствий деформации частиц микрогеля. Выведены эмпирические зависимости, включающие совместное влияние описанных выше факторов, для прогнозирования коэффициента максимального растекания β_{max} и коэффициента минимальной высоты ζ_{min} , позволяющие оценить геометрические размеры биополимерного слоя. Полученные результаты прикладного исследования представляют интерес для технологий биопечати и одноэтапного производства функциональных гетерогенных слоёв.

Список литературы:

1. Zhang P., Chang K.-C., Abate A.R. Precision ejection of microfluidic droplets into air with a superhydrophobic outlet // *Lab Chip*. 2021. V. 21. P. 1484-1491.
2. Alzanbaki H., Moretti M., Hauser C.A.E. Engineered Microgels—Their Manufacturing and Biomedical Applications // *Micromachines*. 2021. V. 12.
3. Kamperman T., Henke S., van den Berg A., Shin S.R., Tamayol A., Khademhosseini A., Karperien M., Leijten J. Single Cell Microgel Based Modular Bioinks for Uncoupled Cellular Micro- and Macroenvironments // *Adv. Healthc. Mater.* 2017. V 6. 1600913.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-29-20109,
<https://rscf.ru/project/22-29-20109/>
и средств Администрации Томской области*

УДК 532.528.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖИДКОСТИ НА ПРЯМОТОЧНОЙ И РОТАЦИОННОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

Радзюк А.Ю.

Сибирский федеральный университет,
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79

Большое количество факторов, влияющих на параметры, при которых начинаются кавитационные эффекты (температура, давление, содержание газов, твердых частиц, примесей в потоке и т.п.) требует простых и надежных способов определения динамической прочности жидкости. В настоящее время для регистрации разрыва сплошности потока используются различные методы и их комбинации:

- визуальные методы наблюдения, включая высокоскоростную съемку и PIV-метод;
- гидравлические методы, основанные на изменении параметров потока (расхода, скорости, перепада давлений, гидродинамических усилий и т. п.);
- акустические методы;
- электрические (омические, электроемкостные);
- химические
- радиоактивные и т.д.

Описываемый метод базируется на получении кривых, аналогичных кривым текучести, представляющих собой зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига. О наличии кавитационных эффектов в потоке при анализе таких кривых будет свидетельствовать уменьшение коэффициента динамической вязкости ниже известной величины, характерной для сплошного течения.

Основным элементом прямооточной экспериментальной установки являлся цилиндр с подвижным поршнем (шприц), соединенный тонким каналом (0,25 мм) с питающим сосудом, заполненным исследуемой жидкостью. Под действием измеряемой силы, прикладываемой к поршню, создается растягивающее напряжение, поршень перемещается, пропуская через канал определенный объем жидкости из основного цилиндра. Сила, прикладываемая к поршню, пропорциональна напряжению сдвига в жидкости, а скорость его движения – скорости сдвига. Отношение напряжения сдвига к скорости сдвига представляет собой коэффициент динамической вязкости.

В ротационной установке суть метода состоит в измерении напряжения сдвига при вращении кавитационной крыльчатки в миксере при различных скоростях сдвига, меняющихся от величин, когда движение является докавитационным (сплошным) до стадии развитой кавитации. Величина напряжения сдвига определялась по величине тока в обмотках электродвигателя, а скорость сдвига принималась пропорционально скорости вращения крыльчатки.

На ротационной установке эксперименты проведены в диапазоне давлений от 0,1 бара до атмосферного давления. Для обработки полученных данных проведена их аппроксимация с использованием метода локальной полиномиальной регрессии, что поз-

волило продемонстрировать изменение коэффициента динамической вязкости. В области сплошного течения этот коэффициент являлся константой, а с началом нарушения сплошности потока уменьшался.

Результаты, полученные на прямооточной (см. рис. 1) и ротационной (см. рис. 2) экспериментальных установках, позволили продемонстрировать принципиальную возможность определения наличия разрыва сплошности потока по анализу измеряемых величин.

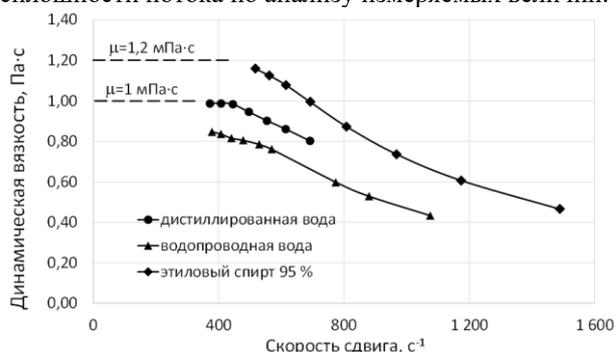


Рис. 1. Результаты, полученные на прямооточной экспериментальной установке.

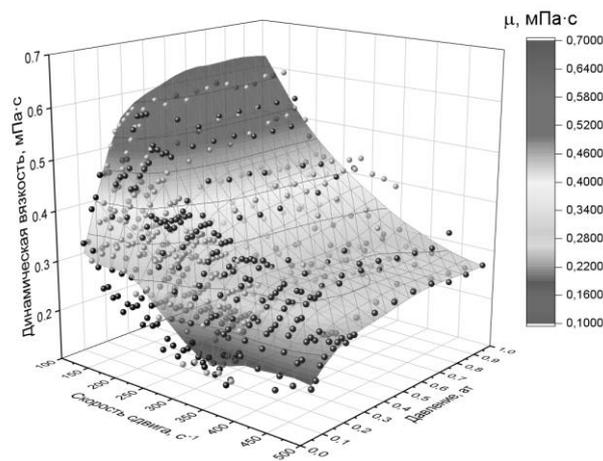


Рис. 2. Результаты, полученные на ротационной экспериментальной установке.

Перспективы практической реализации предложенного подхода к определению кавитационной прочности жидкости связаны с применением непосредственного аппаратного измерения напряжения сдвига и вращающего момента. В этом случае предлагаемый метод должен показать большую точность и может существенно упростить анализ кавитационной прочности технологических жидкостей, используемых в различных технологических процессах.

УДК 532.64

РЕЖИМЫ СТЕКАНИЯ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ НА ВЕРТИКАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ ПРИ УГЛАХ СМАЧИВАНИЯ ДО 90° И ЧИСЛЕ РЕЙНОЛЬДСА 50

Сахнов А.Ю., Володин О.А., Печёркин Н.И., Павленко А.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Стекающие плёнки широко распространены в различных технических устройствах для интенсификации процессов теплообмена. Контактный угол смачивания оказывает существенное влияние на режим растекания жидкости и, как следствие, на площадь смачиваемой поверхности. В работе [1] проведено моделирование стекающей плёнки воды на горизонтальных трубах при $Re = \Gamma/\nu = 3$ и $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ методом VOF (здесь Γ – расход жидкости на единицу ширины плёнки, м/с; ν – кинематическая вязкость, м²/с). Для угла смачивания 10° авторы моделировали числа Рейнольдса 3, 6 и 9. Авторы работы [2] исследовали натекание плёнок раствора LiBr-H₂O на горизонтальные трубы в более широких диапазонах числа Рейнольдса ($3,5 < Re < 13,25$) и угла смачивания ($0^\circ < \theta < 120^\circ$). В этих работах показано, что с увеличением угла смачивания характер распространения плёнки изменяется от струйного режима к капельному при фиксированном числе Рейнольдса. Подробный обзор исследований динамики стекающих плёнок представлен в статье [3]. В данной работе мы исследовали влияние контактного угла смачивания при числе Рейнольдса 50 на характеристики стекания плёнки смеси фреонов вдоль гладкого вертикального цилиндра на основе результатов трёхмерного численного моделирования двухфазного течения.

Рассматривалось растекание плёнки смеси фреонов R21 (мол. доля: 0,9) и R114 по четверти круглого вертикального цилиндра радиусом 25 мм и высотой 90 мм (рис. 1). Расчётный объём ограничивался мнимым цилиндром радиусом 26–30 мм в зависимости от угла смачивания. На верхней горизонтальной плоскости задавалась область с начальной толщиной плёнки жидкости $\delta = 0,25$ мм и начальной скоростью жидкости $V_0 = -0,048$ м/с. С учётом свойств указанной смеси фреонов число Рейнольдса равно 50, а число Вебера – 0,047. Число Капицы для всех случаев течения составило 3801. Контактный угол смачивания θ задавался от 10° до 90° с шагом в 20° .

Моделирование проводилось с применением метода объёма жидкости (VOF) [4] в пакете OpenFOAM. Использовалось приложение «compressibleInterFoam», включающее уравнения сохранения массы, импульса, энергии и переноса объёма жидкости. θ°

На рис. 2 приведены зависимости величины смоченной поверхности цилиндра от времени в безразмерных координатах при углах смачивания от 10° до 90° и числа Рейнольдса 50. Безразмерная площадь определялась как отношение площади смоченной поверхности к четверти площади боковой поверхности цилиндра. Безразмерное время было получено через начальную скорость и толщину плёнки. Смоченная

поверхность учитывает все области контакта жидкости и поверхности цилиндра, включая капли и различные струи.

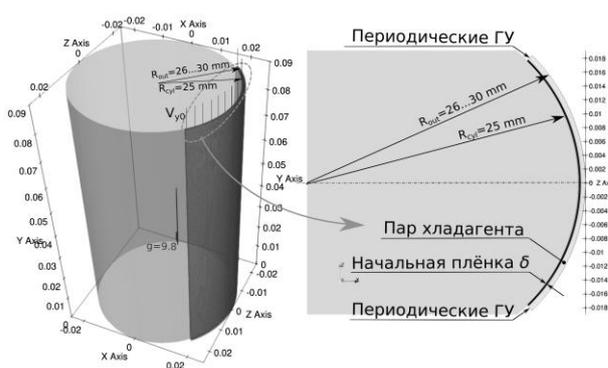


Рис. 1. Схема течения.

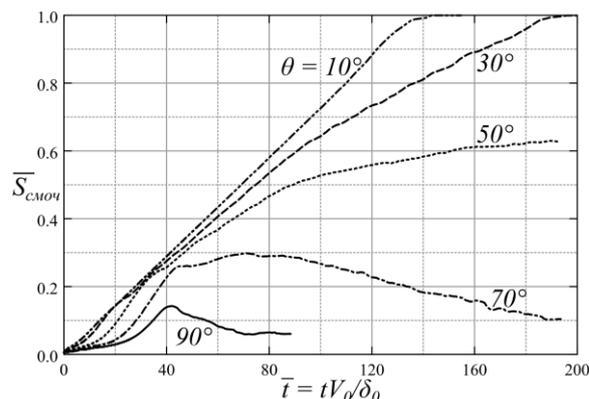


Рис. 2. Изменение площади смоченной поверхности во времени при различных углах смачивания.

Список литературы:

1. Ramadan Z. and Park C.W. Hydrodynamic behavior of liquid falling film over horizontal tubes: Effect of hydrophilic circular surface on liquid film thickness and heat transfer // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. V. 24. Paper No 10082.
2. de Arroiabé P. F., Martínez-Urrutia A., Peña X., Martínez-Agirre M., Mounir Bou-Ali M. Influence of the contact angle on the wettability of horizontal-tube falling films in the droplet and jet flow modes // Int. Journal of Refrigeration. 2018. V. 90. P.12–21.
3. Dai Z., Zhang Y., Wang S., Nawaz K., Jacobi A. Falling-film heat exchangers used in desalination systems: A review // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. V. 85. Paper No 122407.
4. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. V. 39(1). P. 201–225.

Моделирование свойств смеси хладагентов выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН, численное исследование стекания жидкости выполнено при финансовой поддержке мегагранта Министрства науки и высшего образования Российской Федерации (номер соглашения No 075-15-2021-575)

УДК 532.542.4, 532.574.7, 532.582.3

АНАЛИЗ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ КАВИТАЦИОННОГО ОБТЕКАНИЯ КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА: СТАРШИЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОМЕНТЫ ФЛУКТУАЦИЙ СКОРОСТИ

Северин А.С.^{1,2}, Лебедев А.С.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Цилиндрические поперечно обтекаемые объекты широко используются в различных теплообменных, энергетических и теплотехнических устройствах. Топливные элементы атомных электростанций, передние кромки лопаток гидротурбин, кромки крыльев и лопастей самолетов часто представляют собой цилиндр или его часть. Несмотря на кажущуюся простоту геометрии, течение вокруг цилиндрического объекта имеет достаточно сложную статистическую структуру, характеризуемую присутствием возвратных течений, образованием кавитации на поверхности, а также наличием областей контргradientного переноса энергии или обратного энергетического каскада.

В литературе встречаются такие режимы течения, как докритический (ламинарный пограничный слой вдоль обтекаемой поверхности), критический (переход к турбулентности в пограничном слое) и сверхкритический [1]. Критический режим течения реализуется в диапазоне чисел Рейнольдса примерно от 150000 до 400000 и характеризуется значительным уменьшением лобового сопротивления объекта исследования. При реализации критического режима течения характеристики потока зависят от уровня турбулентности, шероховатости поверхности, материала поверхности и общей геометрии экспериментальной модели (отношение поперечного сечения канала к лобовой площади цилиндра и отношение длины цилиндра к диаметру) [2].

Цилиндр представляет собой слабо обтекаемое тело с подвижной точкой отрыва [3]. При обтекании цилиндра в результате глобальной неустойчивости образуются вихри Кармана и продольные вихри. Кроме того, мелкие вихри Кельвина-Гельмгольца формируются в сдвиговом слое в результате усиления конвективной неустойчивости. Отрыв вихрей обуславливает значительные вибрации, акустический шум и резонанс, интенсификацию перемешивания, а также существенно увеличивает лобовое сопротивление и индуцирует флуктуации подъемной силы. Поэтому управление отрывом потока от поверхности цилиндра играет очень важную роль в различных инженерных приложениях.

В литературе накоплен обширный объем экспериментальных данных по кавитационным течениям, включая результаты PIV измерений скорости жидкости. Тем не менее информация о влиянии материала поверхности на турбулентные характеристики (в частности, старшие статистические моменты флуктуационной составляющей скорости жидкости) ближней

зоны кильватерного следа при кавитационном обтекании круглого цилиндра отсутствует в открытых источниках. В то же время гидрофобные свойства материала могут оказывать значительное влияние на пограничный слой из-за образования микропузырьков, и именно поэтому изучение турбулентной структуры таких течений и определение влияния различных конфигураций различных гидрофобных покрытий является чрезвычайно важной задачей современной гидродинамики.

Экспериментальное исследование поля скорости и скоростная визуализация осуществлялись при помощи метода стробоскопической трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry – PIV). Измерительная система состояла из генератора сигналов BNC 575, используемого для внешней синхронизации, импульсного Nd:АИГ лазера Photonics Industries DM-532-50 (длина волны 532 нм, максимальная частота генерации импульса до 15 кГц, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 15 мДж), а также двух высокоскоростных камер Photron Nova S12: первая камера использовалась для съемки потока в области отрыва за цилиндром, вторая – для съемки потока в пристенной области вблизи точки отрыва. Съемка проводилась с частотой 10 кГц и разрешением 1024 x 1024 пикселей. Мгновенные изображения обрабатывались при помощи программного обеспечения ActualFlow.

В данной работе проведено экспериментальное исследование влияния гидрофобных покрытий на турбулентную структуру течения, кавитирующего на поверхности круглого цилиндра. Исследование проведено для сверхкритических чисел Рейнольдса при различных давлениях набегающего потока. Проведен сравнительный анализ турбулентных характеристик для исследуемых конфигураций объекта исследования с целью проанализировать влияние различных покрытий на интенсивность образования паровой фазы.

Список литературы:

1. Roshko A. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number // Journal of Fluid Mechanics. 1961. Vol. 10. No. 3. P. 345-356.
2. Farell C., Blessmann J. On critical flow around smooth circular cylinders // Journal of Fluid Mechanics. 1983. Vol. 136. P. 375-391.
3. Choi H., Jeon W.P., Kim J. Control of flow over a bluff body // Annual Review of Fluid Mechanics. 2008. Vol. 40. P. 113-139.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН

УДК 532.62

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ СТРУЙ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТИ

Семионов В.В.¹, Милешкин М.С.², Сергеев Е.М.², Чиннов Е.А.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

При гравитационном течении плёнок жидкости по нагревателям происходит развитие неустойчивостей разных типов и формирование регулярных структур.

Исследование струйных течений в нагреваемой плёнке жидкости важно для понимания процессов теплообмена и развития кризисных явлений.

Впервые регулярные структуры на поверхности нагреваемой плёнки жидкости были описаны в работах [1, 2], где исследовалось течение плёнки 25% раствора спирта по нагревателю малого размера 6.5x13 мм. При плотности теплового потока выше порогового значения на нагревателе формировался горизонтальный вал, что приводило к движению жидкости в виде вертикальных струй и тонкой пленки между ними. В работе [3] выделены 2 типа регулярных структур (А и В) в плёнках жидкости, стекающих по нагревателю размером 150x150 мм.

При достижении значений теплового потока, соответствующих появлению в верхней части нагревателя структур типа А, наблюдались существенные отклонения струй от вертикального направления (витания) и взаимодействия между ними (см. рис. 1). В качестве характеристики перемещений струй в поперечном направлении была предложена максимальная амплитуда витаний – расстояние между крайним правым и крайним левым положением струи. [4] В работе [5] были выделены 4 типа взаимодействий между струями.

Целью данной работы было исследование витаний и взаимодействий струй на поверхности нагреваемой плёнки жидкости при числе Рейнольдса $Re=75$ с применением нейросети.

Экспериментальный стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур, включавший в себя рабочий участок, термостат с насосом, трубопроводы, ротаметр и запорную арматуру. Рабочий участок состоял из текстолитовой плиты и расположенных на ней плёнкоформователя, термостабилизатора и нагревателя. В качестве нагревателя использовался плоский теплообменник длиной 100 мм и шириной 150 мм, внутри которого по каналам прокачивалась нагретая вода. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Рабочая жидкость с помощью насоса подавалась в плёнкоформователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Более подробное описание установки содержится в [6]. Для определения мгновенного поля толщины и волновых характеристик пленки использован модифицированный флуоресцентный метод, в качестве красителя был выбран Родамин 6Ж. Температура поверхности измерялась инфракрасным сканером Titanium 570M.

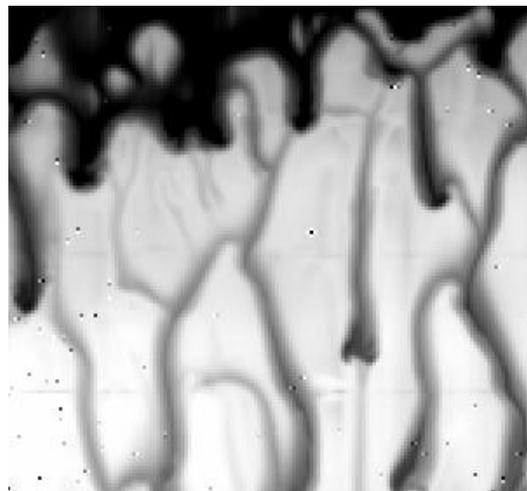


Рис. 1. Картина течения струй в центральной части нагревателя. $Re=75$, $T_0=25$ °C, $q=7.71$ Вт/см².

Для определения амплитуды отклонения и фиксации взаимодействий струй использовалась нейронная сеть YOLOv5. Эта нейросеть позволяет быстро и с высокой точностью решать задачу детекции объектов и, как следствие, определять положение струй.

Перемещение и взаимодействие струй способствует предотвращению появления сухих пятен на поверхности нагревателя, повторному орошению осушенных зон и увеличению критического теплового потока, соответствующего разрыву пленки жидкости.

Список литературы:

1. Кабов О.А. Теплоотдача от нагревателя с малым линейным размером к свободно стекающей пленке жидкости // Тр. Первой Росс. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ. 1994. Т. 6. С. 90-95.
2. Kabov O.A., Diatlov A.V., Marchuk I.V. Heat transfer from a vertical heat source to falling liquid film // Proc. of the First Int. Symp. on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation. / Eds. G.P. Celata and R.K. Shah. 9-11 October, 1995. Rome, Italy. Vol.1. P. 203-210.
3. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой плёнки жидкости // ПМТФ, 2003, Т. 44, № 5, С.128-137.
4. Semionov V.V., Rivulet deflection in heated liquid film with different initial characteristics // J. of Physics: Conf. Series, 2021, V. 2119, 012071
5. Чиннов Е.А., Семионов В.В. Взаимодействие струй на поверхности нагреваемой плёнки жидкости // ПЖТФ, 2022, Т. 48, № 23, С.18-21.
6. Chinnov E.A. Formation of the unsteady thermocapillary structures in the residual layer of three-dimensional waves // Int. J. Heat Mass Transfer 2017 V. 108 P. 2053–2059.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН

УДК 536.24

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАЗРЕЖЕННОМ ГАЗОСПРЕЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Сибиряков Н.Е., Димов С.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Для измерения характеристик спрея была сделана установка, схема которой приведена на рис. 1. Воздух подаётся из компрессора через регулятор расхода, вода подаётся из шприцевого насоса, чтобы контролировать малый расход жидкости и имеет комнатную температуру 25°C. Полученный спрей падает на пластину из нержавеющей стали, посередине которой имеется отверстие для тонкого конца медного нагревателя площадью 1 см². В узкой части нагревателя и в стальной пластине имеются термопары для контроля за температурой поверхности и тепловыми потоками, попадающими на поверхность нагревателя и растекающимися по поверхности стальной пластины. По данным этих термопар вычисляется тепловой поток, отводимый спреем, и температура поверхности нагревателя.

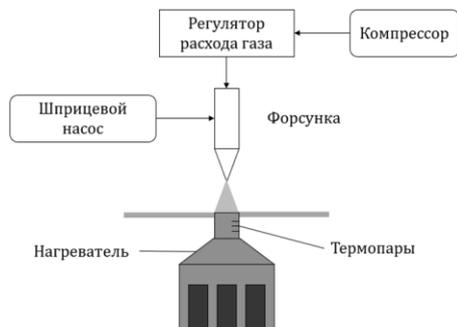


Рис. 1. Схема установки для измерения теплового потока, отводимого спреем.

Внутри сопла имеется канал для подачи воды, сделанный из стальной трубки, в которую вставлен капилляр. Воздух поступает во внешнюю широкую часть сопла и на выходе поток газа отрывает мелкие капли воды, которые затем переносятся на нагреватель. Для экспериментов было сделано 2 сопла с различными диаметрами внутреннего капилляра (0,25 мм и 0,5 мм), по которым подаётся вода.

В процессе опыта задавались расходы жидкости и газа, мощность, выделяемая на нагревателе. На основе измеренных температур определялись создаваемый тепловой поток и температура поверхности нагревателя.

$$HTC = q / (T_w - T_{in}),$$

где q – тепловой поток, T_w – температура поверхности нагревателя, T_{in} – температура подаваемой жидкости и газа. Тепловой поток определяется по измеренным показаниям термопар в носике нагревателя и стальной подложке. Температура поверхности определялась аппроксимацией измеренных значений показателей термопар в носике нагревателя.

На рис.2 приведено значения коэффициента теплообмена от нагреваемой поверхности при расходе газа 5 л/мин в зависимости от расхода подаваемой жидкости. При увеличении расхода жидкости вначале

наблюдается увеличение коэффициента теплообмена с последующей стабилизацией. Выход на коэффициент теплоотдачи, слабо зависящий от расхода жидкости или газа наблюдается, когда температура поверхности опускается ниже температуры кипения.

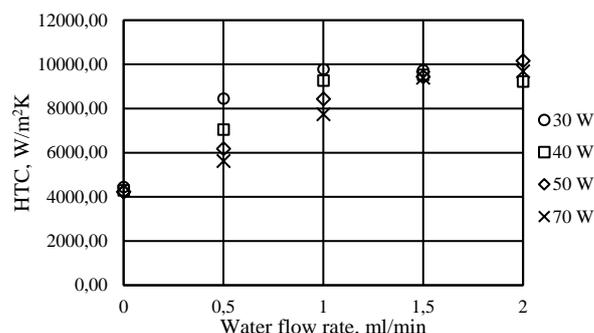


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплообмена от расхода жидкости для форсунки с капилляром 0,25 мм при расходе газа 5 л/мин.

На рисунке 3 приведены значения коэффициента теплообмена от нагреваемой поверхности в зависимости от расхода газа. Также как и при повышении расхода воды наблюдается увеличение коэффициентов теплообмена с увеличением расхода газа. При охлаждении поверхности ниже температуры кипения, коэффициент теплоотдачи слабо зависит от расхода газа и жидкости.

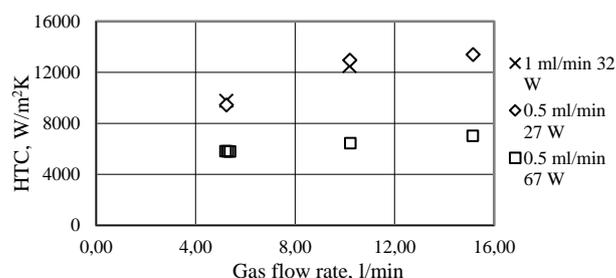


Рис. 3. Коэффициент теплообмена в зависимости от расхода газа.

При охлаждении поверхности разреженным спреем, коэффициент теплоотдачи растёт с увеличением расхода жидкости и газа для различных геометрий форсунки. Однако этот рост сильно замедляется, когда температура поверхности охлаждается ниже температуры кипения жидкости. Это связано с тем, что меньшая часть воды успевает испариться с подложки, а теплота межфазного перехода жидкость-пар для воды много больше теплоты нагревания от 25°C до 100°C.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №21-79-10373. Ссылка на информацию о проекте <https://rscf.ru/project/21-79-10373/>

УДК 534.222.2, 544.454.3

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ И КОЛЛЕКТОРЕ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ СМЕСЕЙ ВОДОРОД-ВОЗДУХ

Симонов Е.В.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

Непрерывная спиновая детонация (НСД) в поперечных детонационных волнах (ПДВ) по схеме Б.В. Войцеховского [1] в настоящее время интенсивно исследуется как российскими, так и зарубежными учеными. НСД является эффективной альтернативой обычному (дефлаграционному) горению в камерах сгорания (КС) небольших габаритов. Детонационному горению сопутствуют ударные волны, заходящие в систему подачи компонентов смеси и существенно влияющие на весь процесс [2]. Представляет интерес численно исследовать возникающие в КС и коллекторе в процессе НСД профили давлений и сравнить полученные данные с экспериментом.

В работе [2] была разработана физико-математическая модель НСД стехиометрической смеси водород-воздух, проведены численные расчеты для кольцевой цилиндрической КС диаметром 306 мм и верифицированы на экспериментальных данных [1]. В данной работе, на основе [2], разработана модель НСД для нестехиометрических смесей водород-воздух. Аналогично [2], энерговыделение описывалось в рамках двухстадийной модели кинетики с уравнением химической кинетики по Николаеву. Проведено численное моделирование для КС диаметром 503 мм и кольцевым зазором $\Delta = 18$ мм, получены профили давления в КС и коллекторе, проведено сравнение с экспериментами.

Для размера щели подачи воздуха $\delta = 6$ мм, коэффициента избытка горючего $\varphi = 0,6$ и удельного расхода смеси $g_{\Sigma} = 390,62$ кг/(с·м²) получено решение с тремя ПДВ ($n = 3$, трехволновой режим) высотой $h \approx 7,5$ см, непрерывно вращающимися в КС со скоростью $D \approx 1,48$ км/с. На рис. 1 представлено распределение температур (изотермы T/T_0 , $T_0 = 293$ К) в КС на момент времени $t = 18,7$ мс.

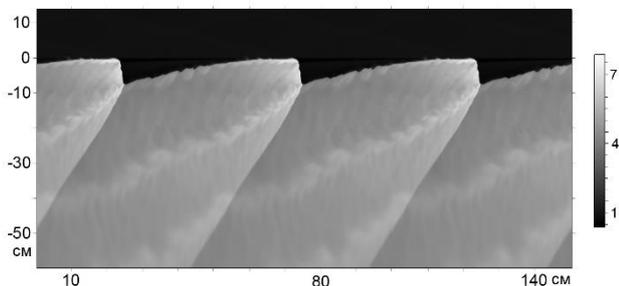


Рис. 1. Расчетная двумерная структура НСД смеси водород – воздух (изотермы T/T_0) при $g_{\Sigma} = 390,62$ кг/(с·м²), $\varphi = 0,6$, $n = 3$

Наблюдаются 3 ПДВ, распространяющиеся слева-направо вдоль КС, перед каждой хорошо виден холодный треугольный слой натекающей смеси, влево-вниз отходят косые ударные волны. В процессе расчета НСД численно получены профили давления в КС и коллекторе: статического – в КС на расстоянии 81 мм от входа (p_1), на выходе из КС (p_{ex}), в коллекторе на расстоянии 55 мм ($p_{m,1}$) и 133 мм от входа в КС ($p_{m,2}$); среднего – на расстоянии 15 мм ($\langle p_2 \rangle$) и 61 мм ($\langle p_1 \rangle$) от входа в КС, на выходе из КС ($\langle p_{ex} \rangle$), на входе в коллектор ($\langle p_{m,in} \rangle$); и полного – на выходе из КС ($p_{0,ex}$). График зависимости статических давлений в различных точках КС и коллектора приведен на рис. 2.

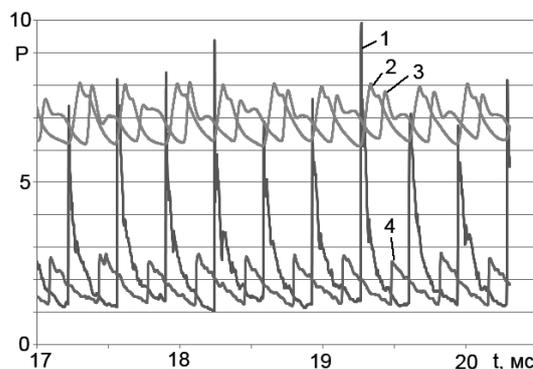


Рис. 2. Зависимости статического давления от времени (атм): 1 - p_1 , 2 - $p_{m,1}$, 3 - $p_{m,2}$, 4 - p_{ex} .

Для статических давлений получены следующие амплитуды (пики давления) во фронте волны: $p_1 = 10$ атм, $p_{ex} = 2,8$ атм, $p_{m,1} \approx p_{m,2} = 8$ атм. Средние давления составили $\langle p_1 \rangle \approx 3,3$ атм, $\langle p_2 \rangle \approx 4,1$ атм, $\langle p_{ex} \rangle \approx 1,85$ атм, $\langle p_{m,in} \rangle \approx 7$ атм, полное $p_{0,ex} \approx 4,9$ атм.

Сравнение расчетных данных с экспериментальными показало хорошее соответствие по числу волн (совпадает с экспериментом), их высоте и скорости, удовлетворительное соответствие по профилям давлений, отличие составило в среднем 10-30%.

Список литературы:

1. Непрерывная спиновая детонация. / Быковский Ф.А., Ждан С.А. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
2. Ждан С.А., Рыбников А.И., Симонов Е.В. Моделирование непрерывной спиновой детонации водородовоздушной смеси в кольцевой цилиндрической камере сгорания // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 2. С.95-106. DOI 10.15372/FGV20200212.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований № 2.3.1.2.4

УДК 531.3, 53.05, 532.5

КАВИТАЦИОННОЕ ОБТЕКАНИЕ КРЫЛА СО СТРУКТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Скрипкин С.Г.^{1,2}, Старинский С.В.¹, Цой М.А.¹, Васильев М.М.², Кравцова А.Ю.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Кавитация является крайне нежелательным явлением при работе насосов и двигателей, а также высоконапорных гидротехнических сооружений [1-2]. Нивелировать вред кавитации пытаются различными активными [3-4] и пассивными [5] способами. Оптимальными методами воздействия на двухфазный поток являются методы пассивного воздействия. Один из таких методов подробно рассматриваются в данной работе.

Некоторые авторы уже сосредоточили свое внимание на том, как структура поверхности воздействует на гидродинамическую кавитацию [5-6]. Введено математическое описание шероховатости поверхности [7], что позволяет проводить сопоставление результатов различных авторов. Показано, что измененная структура поверхности, имеющая направленность относительно набегающего потока, может оказывать значительное воздействие на кавитацию, однако причины такого воздействия в работах практически не рассматриваются.

Для создания структурной поверхности в работе применялся метод импульсной лазерной абляции [8]. Подход позволяет контролировать размер шероховатости, его пространственную однородность и направленность относительно набегающего потока, тем самым позволяя рассмотреть влияние структурной поверхности на кавитационные процессы комплексно. Целью данной работы является анализ результатов влияния структурной поверхности на кавитационное течение и объяснение причин влияния морфологии поверхности на развитие каверн.

Для анализа развития кавитационных полостей на крыльях с гладкой и структурной поверхностями была проведена скоростная визуализация потока [9].

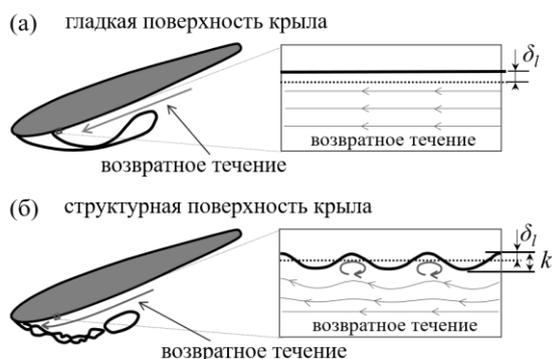


Рис. 1 Движение жидкости вблизи поверхности крыла с (а) гладкой и (б) структурной границей.

Сопоставление интегральных характеристик кавитационных течений вблизи двух тел обтекания пока-

зало, что лазерное текстурирование задерживает зарождение кавитации, и интенсифицирует кавитационные процессы при уменьшении числа кавитации.

Визуализация эволюции каверн позволила продемонстрировать, что «прилипание» присоединенной каверны к структурной поверхности крыла происходит в меньшей степени, чем для тела с гладкой поверхностью. Возвратного течения для профиля с нанесенной текстурированной поверхностью пульсирует.

Причиной возникающих пульсаций возвратного течения являются небольшие вихри, возникающие в области шероховатости поверхности (см. рис. 1). Более подробное описание можно найти в работе [10].

Таким образом, в работе показано, что небольшие структурные выступы, достаточно сильно изменяют гидродинамику кавитационного потока особенно на ранних стадиях зарождения и развития полостей. Данное исследование является полезным открытием для ряда технических приложений.

Список литературы:

1. Skripkin S., Zuo Z., Tsoy M., Kuibin P., Liu S. Oscillation of Cavitating Vortices in Draft Tubes of a Simplified Model Turbine and a Model Pump-Turbine // *Energies*. 2022. V. 15, Iss. 8, P. 2965.
2. Timoshevskiy M.V., Churkin S.A., Kravtsova A.Y., Pervunin K.S., Markovich D.M., Hanjali'c K. Cavitating flow around a canted-down model of guide vane so fa high-pressure turbine // *International Journal of Multiphase Flow*. 2016. V. 78. P. 75-87.
3. Akcabay D.T., Chae E.J., Young Y.L., Ducoin A., Astolfi J.A. Cavity induced vibration of flexible hydrofoils // *Journal of Fluids and Structures*. 2014. V. 49. P. 463-484.
4. Xu P., Liu S., Zuo Z., Pan Z. On the criteria of large cavitation bubbles in a tube during a transient process // *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. P. 913.
5. Petkovšek M., Hočevarb M., Gregorčiča P. Surface functionalization by nanosecond-laser texturing for controlling hydrodynamic cavitation dynamics // *Ultrasonics – Sonochemistry*. 2020. V. 67. P. 105126.
6. Kim N., Kim H., Park H. An experimental study on the effects of rough hydrophobic surfaces on the flow around a circular cylinder // *Phys Fluids*. 2015. V. 27. P. 085113.
7. Kadivar M., Tormey D., McGranaghan G. A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories // *International Journal of Thermofluids*, 2021, V. 10, p. 100077.
8. Starinskiy S. V., Shukhov Y. G., Bulgakov A. V. Laser-induced damage thresholds of gold, silver and their alloys in air and water // *Applied Surface Science*. 2017. V. 396. P. 1765-1774.
9. Skripkin S.G., Tsoy M.A., Kravtsova A.Y. Experimental Study of Cavitating Flow around a NACA 0012 Hydrofoil in a Slit Channel // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. P. 11182.
10. Skripkin S.G., Starinskiy S.V., Tsoy M.A., Vasiliev M.M., Kravtsova A.Y. Effect of a textured surface on the occurrence and development of cavitation on the hydrofoil // *Physics of Fluids*. 2023. V. 35. P. 025109-12.

Работа выполнена при поддержке гранта
Российского научного фонда
(проект № 19-79-10217)

УДК 532.546.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ УРАВНЕНИЯ ФОРХГЕЙМЕРА-ЭРГУНА ПРИ НАПОРНОМ ТЕЧЕНИИ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ В СЛОЕ ШАРОВЫХ ЧАСТИЦ

Таиров Э.А., Сафаров А.С., Хан П.В.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Для определения потери давления при фильтрации жидкости и газа через пористые среды широко применяется двучленное уравнение Форхгеймера с коэффициентами Эргуна (ФЭ), которое имеет следующий вид для восходящего однофазного потока:

$$-\frac{dp}{dz} - \rho g = \frac{k_\alpha(1-m)^2 \mu w_0}{m^3 d_p^2} + \frac{k_\beta(1-m) \rho w_0^2}{m^3 d_p} \quad (1)$$

Здесь p – давление в потоке, z – координата в вертикальном направлении, w_0 – скорость фильтрации, отнесенная к полному сечению, m – пористость, d_p – диаметр шаровых частиц пористого слоя, ρ – плотность, μ – коэффициент динамической вязкости.

Наиболее часто применяются предложенные Эргуном значения коэффициентов

$$k_\alpha = 150, k_\beta = 1,75. \quad (2)$$

Эти значения использованы для обработки опытов по падению давления при течении холодной воды через моноразмерные слои сферических частиц диаметром от 1 мм до 8 мм в недавно выполненных исследованиях [1, 2]. Авторы [1] рассмотрели скорость фильтрации до 23 мм/с, среднее относительное расхождение экспериментальных и прогнозируемых падений давления не превысило 7%. В работе [2] скорость фильтрации воды изменялась в диапазоне 3,8 – 53 мм/с, относительное расхождение между расчетом и экспериментом составило 20%.

Целью данной работы является уточнение коэффициентов Эргуна для воды в широком диапазоне изменения скоростей и температур.

Выполнены эксперименты по измерению падения давления при течении воды через плотноупакованный слой шаровых частиц диаметром 2 и 3 мм в вертикальном теплоизолированном цилиндрическом канале диаметром 39 мм при температуре от 17°C до 175°C, скорости фильтрации w_0 от 5 до 280 мм/с.

Датчики перепада давления DMD-331-A-S с диапазоном измерения 250 кПа были установлены на кольцевых отборах с расстоянием 470 мм и 370 мм. Температура поступающей в канал воды измерялась датчиком PT100. Расход воды через установку определялся кориолисовым расходомером ЭМИС-МАСС 260 и измерением времени заполнения контрольного объема.

Сравнение полученных экспериментальных данных с расчетом по уравнению ФЭ (1), (2) показало, что использование констант (2) справедливо при низких скоростях фильтрации $w_0 \leq 25$ мм/с. При более высоких скоростях потока их использование существенно завышает результаты расчета над экспериментальными данными. Поскольку в области повышенной скорости потока существенным является вклад инерционного слагаемого, принято сохранить во всей области изменения w_0 числовой коэффициент k_α при вязкостном слагаемом, а получить новое выражение для коэффициента k_β при инерционном члене.

Значения коэффициента k_β были найдены методом нелинейной регрессии для каждой серии опытных данных с постоянными значениями диаметра частиц и температуры. Установлено, что влияние диаметра частиц не является существенным, а влияние температуры может быть учтено через изменение плотности воды следующим образом:

$$k_\beta = 150, k_\beta = 2,317[\rho(T) / \rho(17^\circ\text{C})] - 0,995. \quad (3)$$

С целью минимизации погрешности предложено использовать для низких скоростей до 25 мм/с исходные коэффициенты Эргуна (2), для скоростей свыше 100 мм/с коэффициенты, определяемые уравнением (3), и интерполяцию k_β для скоростей в диапазоне 25-100 мм/с. Расчет потери давления в слое по предложенной методике согласуется с опытными данными со средней погрешностью 7,5 % (см. рис. 1).

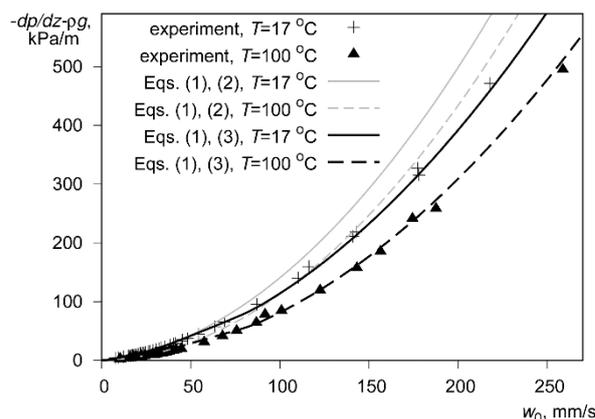


Рис. 1. Зависимость градиента давления от скорости фильтрации воды.

Результаты исследования показали, что в области скоростей фильтрации, характерных для напорного течения, коэффициент k_β ниже предложенного Эргуном и составляет 1,0 – 1,37, причем его значения мало зависят от диаметра частиц в диапазоне 2 – 3 мм, а влияние температурной зависимости плотности воды может быть учтено линейным выражением.

Список литературы:

1. Li L. et al. Investigations on two-phase flow resistances and its model modifications in a packed bed // Int. J. Multiph. Flow. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 101. P. 24–34.
2. Oh J.S. et al. Hydrodynamic behaviors of adiabatic and diabatic two-phase flow within various particle beds // Int. J. Heat Mass Transf. Elsevier Ltd, 2022. Vol. 194. 123124.

Работа выполнена на ЦКП «Высокотемпературный контур» в рамках государственного задания (№ FWEU-2021-0005) Программы фундаментальных исследований Российской Федерации на 2021-2030 годы., рег. № АААА-А21-121012190004-5

УДК: 519.6:532.5:62-9

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЙЛЕРОВЫХ МОДЕЛЕЙ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПК ANSYS НА ЗАДАЧЕ РАСПЫЛА СЫРЬЯ В ПОТОКЕ ГАЗА-ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПЕЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Тарраф Даниэль¹, Черный С.Г.²

¹ Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Углеродная сажа образуется из нефтесодержащего сырья нагреванием его примерно до 950 °С. При этом происходит его крекинг с образованием газа и порошковой углеродной сажи [1]. Эти компоненты проходят через фильтры, извлекающие углеродную сажу. При добавлении воды порошок гранулируется. Гранулы сушатся и кондиционируются. Полученная углеродная сажа применяется при производстве самых разнообразных материалов. Но около 70% всего выпускаемого углерода используется в производстве пневматических шин. Наиболее сложным этапом процесса производства углерода является впрыскивание форсунками жидкого углеводородного сырья в поток газа-теплоносителя с целью создания нужной степени распыла сырья. Процесс распыливания жидкости на реальных форсунках может происходить при широких диапазонах размера частиц (капель) жидкости, плотности засеивания потока газа частицами жидкости и существенной неравномерности распределения капель в газовом потоке. В то же время необходимо, чтобы мелкость распыла сырья, равномерность распределения капель в потоке газа обеспечивали полное его испарение до начала пиролиза и оптимальную структурность технического углерода. А вероятность образования кокса (грита), загрязняющего продукт, была минимальной [2]. Сформулированные требования к процессу распыла и испарения сырья в потоке газа-теплоносителя могут быть выполнены только при возможности проведения трехмерного численного моделирования данного процесса. Именно численные методы позволят лучше понять структуру потока и выявить факторы, влияющие на эффективность распыла и испарения сырья, следовательно, и – на качество получаемого углерода. Разработана методика численного моделирования трехмерных двухфазных (газ-теплоноситель и сырье) и трехфазных (газ-теплоноситель, сырье и продукты испарения сырья) течений в реакторе по производству технического углерода. За основу взяты Эйлеровы модели многофазных течений, базирующиеся на

методе объема жидкости (VOF) [3], реализованные в коммерческом программном пакете (ПК) ANSYS [4]. Рассмотрены и сравнены три VOF модели многофазных течений: двухфазная модель с несжимаемыми фазами и для сырья, и для газа; двухфазная модель с несжимаемой фазой для сырья и сжимаемой – для газа; трехфазная модель с несжимаемой фазой для сырья и сжимаемыми фазами для продуктов испарения сырья и газа. Достоверность получаемых результатов численного моделирования обоснована на известной задаче распыла струи жидкости под воздействием потока газа, подробно изученной экспериментально [5] и численно [6]. Разработан и численно реализован метод формирования капель распыла по распределению в области течения объёмной доли сырья. Проведен анализ размеров капель и определен среднезаулеровский диаметр распыла, являющийся важной его характеристикой. Представлены результаты расчета распыла и испарения сырья в реальном реакторе.

Список литературы

1. Технический углерод: морфология, свойство, производство / Гульмисарян Т.Г., Капустин В.М., Левенберг И.П.; М.: Каучук и Резина, 2017. 586 с.
2. Производство и использование технического углерода для резин / Орлов В.Ю., Комаров А.М., Ляпина Л.А.; Ярославль: Александр Рутман, 2002. 512 с.
3. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // *Journal of Computational Physics*. 1981. V. 39. P. 201-226.
4. Моделирование гидрогазодинамических процессов в ПК ANSYS17.0 / Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Захарова Ю.В.; Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2016. 168 с.
5. Wu P.K., Kirkendall K.A., Fuller R.P., Nejad A.S. Spray structures of liquid jets atomized in subsonic crossflows // *J. Propul. Power*. 1998. V. 14. N. 2. P. 173-182.
6. Сипатов А.М., Карабасов С.А., Гомзиков Л.Ю., Абрамчук Т.В., Семаков Г.Н. Моделирование процесса распыла с использованием адаптивных сеточных моделей // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2015. Т. 8. № 1. С. 93-101.

УДК 532.5

КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ВТОРИЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ ПРИ МИКРО-ВЗРЫВНОМ РАСПАДЕ ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Микро-взрывное измельчение двухжидкостных капель при нагреве реализуется в режиме паффинга и микро-взрыва [1]. Эти режимы позволяют получать размеры вторичных жидкостных фрагментов в десятки и даже сотни раз меньше, чем размеры родительской капли [2]. Для практического применения эффектов микро-взрывного распада необходимо исследовать компонентный состав образующихся вторичных фрагментов, в особенности это важно для технологий горения жидких и суспензионных топлив. С увеличением интереса к применению перспективных видов топлив возрастает и необходимость в достоверном анализе компонентного состава исходных и вторичных капель. До настоящего момента задача идентификации типа и концентрации компонентов во вторичных фрагментах не была решена, в этом состоит мотивация настоящего исследования.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований компонентного состава вторичных фрагментов, образующихся при микро-взрывном распаде двухжидкостных капель. В качестве компонентов исследованных двухжидкостных капель использованы вода и рапсовое масло. Исследования проведены при варьировании концентрации компонентов в каплях, температуры внешней среды и схемы нагрева, начальных размеров двухжидкостных капель. Эксперименты проводились для разных условий нагрева исходных капель: в пламени, муфельной печи, на разогретой подложке. Для идентификации компонентного состава вторичных фрагментов был использован метод Laser Induced Fluorescence. Разделение вторичных фрагментов по компонентному составу проводилось на основании разницы светимости компонентов капель под действием лазерного излучения.

На рис. 1. представлено типичное распределение вторичных фрагментов по размерам при микро-взрывном распаде двухжидкостной капли. Как можно видеть из рис. 1 вторичные фрагменты рапсового масла имеют меньшие размеры и, как следствие, большее количество. Размеры вторичных фрагментов воды изменялись в более широком диапазоне. В первую очередь, это обусловлено тем, что поверхностное натяжение рапсового масла ниже, чем поверхностное натяжение воды. При нагреве данная разница существенно увеличивается. Также стоит отметить, что количество вторичных фрагментов, содержащих в своем составе воду и рапсовое масло, не превышало 5% от общего количества образующихся вторичных фрагментов, а размеры таких фрагментов, как правило, не превышали 0,15 мм.

По результатам проведенных исследований установлены типичные распределения вторичных фрагментов по размерам для воды и рапсового масла при фрагментации двухжидкостных капель в условиях

влияния совокупности факторов. Определены средние размеры вторичных фрагментов для воды и рапсового масла. Показано, что этими характеристиками можно управлять за счет варьирования значений группы исходных параметров. Обосновано применение метода Laser Induced Fluorescence для идентификации компонентного состава вторичных фрагментов при микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель. Описаны границы применимости данного подхода.

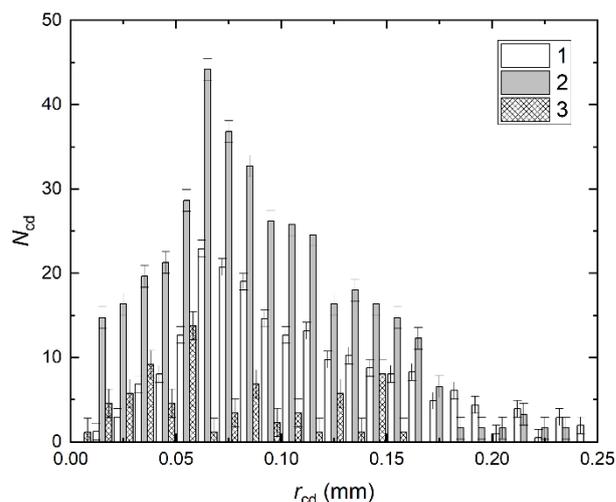


Рис. 1. Типичные распределения вторичных фрагментов по размерам при микро-взрывном распаде двухжидкостной капли на разогретой подложке (концентрация рапсового масла 50 об%; начальный размер капли 1,061 мм; температура подложки 573 К): 1 – вторичные фрагменты воды; 2 – вторичные фрагменты рапсового масла; 3 – фрагменты воды и рапсового масла.

При обобщении результатов выполненных исследований установлены диапазоны варьирования основных параметров, для которых получено максимальное количество вторичных фрагментов с требуемым компонентным составом для различных технологий вторичного измельчения для интенсификации перемешивания и сжигания топлив, очистки жидкостей от примесей, интенсификации фазовых превращений и теплообмена в энергетическом оборудовании.

Список литературы:

1. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // Int. J. Therm. Sci. 2019. V. 142. P. 30–41.
2. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Appl. Therm. Eng. 2020. V. 164. 114501.

*Работа поддержана
Российским научным фондом (проект 21-71-10008,
<https://rscf.ru/project/21-71-10008/>)*

УДК 532.5

ИНЖЕКЦИЯ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА В ПОРИСТЫЙ ПЛАСТ**Хасанов М.К.¹, Бородин С.Л.^{1,2}, Столповский М.В.^{1,3}**¹ Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий,
453103, Россия, Стерлитамак, пр. Ленина, 37² Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН,
625026, Россия, Тюмень, ул. Таймырская, 74³ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
450064, Россия, Уфа, ул. Космонавтов, 1

В последнее десятилетие в мире наблюдается достаточно устойчивая тенденция к росту потребления углеводородного сырья для нужд энергетики и химической промышленности [1]. При этом в нефтегазовой отрасли широко используется тепловое воздействие на насыщенный пористый пласт [2]. Чаще всего нагрев пласта применяется для снижения вязкости нефти и очистки призабойной зоны скважины от склеротических бляшек [3]. Тепловые методы (отдельно или в комбинации с другими методами) могут использоваться также при разработке месторождений природных газогидратов [4,5]. Наиболее распространенным способом нагрева пласта является закачка различных теплоносителей, а наиболее простым, широкодоступным экологически чистым и химически инертным теплоносителем является вода или ее пар. При этом теплосодержание у водяного пара в несколько раз выше, чем у горячей воды. Это обусловлено достаточно большим значением скрытой теплоты парообразования (около 3 МДж/кг). Поэтому инжекция пара в природный пласт позволяет внести значительно больше количество тепла в пласт по сравнению с горячей водой.

Была рассмотрена следующая постановка задачи. Пористый пласт постоянной толщины (с непроницаемыми кровлей и подошвой) в начальный момент времени насыщен метаном. Начальное давление и температура одинаковы во всех точках пласта. Через границу пласта закачивается водяной пар, температура которого превышает равновесную температуру парообразования для данного давления инжекции. В результате инжекции пара в пласте возникают три характерные области. В первой (ближней) области поры насыщены водяным паром, во второй области – водой, в третьей области — метаном. Соответственно существуют две подвижные поверхности: между первой и второй областями (первая граница), на которой происходит конденсация пара, между второй и третьей областями (вторая граница), где происходит вытеснение метана. Таким образом, в рассматриваемой модели предполагается, что в первой зоне фильтруется пар, во второй зоне фильтруется сконденсировавшаяся вода, а в третьей зоне фильтруется метан. В рассматриваемой модели на второй границе происходит вытеснение метана сконденсировавшейся водой (в поршневом режиме, т.к. течения в пористых средах ламинарные, а вязкость воды на два порядка превосходит вязкость метана).

Для указанной постановки задачи на основе уравнений механики многофазных сред выполнена математическая формализация задачи в виде замкнутой

системы дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями. Полученная система основных уравнений включает в себя уравнения сохранения массы и энергии, закон Дарси и уравнения состояния (а также дополняется зависимостью фазовой проницаемости от насыщенности и условиями фазовых равновесий). Для нахождения значений параметров на границах между областями и законов движения этих границ использованы условия баланса массы и энергии на этих границах. При этом в отличие от классической задачи Стефана температуры на границах фазовых переходов были заранее неизвестны, а определялись из распределения давления.

Построены автомодельные решения для случая, когда пласт имеет бесконечную протяженность. Получены распределения давления и температуры в пласте от автомодельной координаты, а также зависимости автомодельных координат фронтальных границ конденсации водяного пара и вытеснения метана водой от давления инжекции и проницаемости пласта. Установлено, что с ростом давления инжекции пара и проницаемости пласта координата границы конденсации пара увеличивается незначительно. Координата второй границы, т.е. фронта вытеснения метана водой, напротив, значительно увеличивается с ростом давления инжекции и проницаемости пласта. Показано, что основное влияние на положение границы фазового перехода оказывает температура закачиваемого в пористый пласт водяного пара.

Список литературы:

1. Z. Hai-Ling, L. Chang-Xin, Z. Meng-Zhen, and S. Yi. Economics, fundamentals, technology, finance, speculation and geopolitics of crude oil prices: an econometric analysis and forecast based on data from 1990 to 2017 // *Petroleum Science*. 2018. Vol. 15, No. 2, pp. 432-450.
2. J. Bourger, P. Sourieau, and M. Combarous Recuperation Assitee du Petrole. Les Methodes Termiques. Paris: Technip, 1984.
3. Байбаков Н.К., Гарушев А.Р. Тепловые методы разработки нефтяных месторождений. М.: Недра, 1977
4. H. Sun, B. Chen, Z. Zhu, L. Zhang, M. Yang, and Y. Song. Research Development in the Traditional Methods and Water Flow Erosion for Natural Gas Hydrate Production: A Review // *Energy Technology*. 2023. Vol. 11, No. 1.
5. S. Y. Misyura and I. G. Donskoy Improving the efficiency of storage of natural and artificial methane hydrates // *J. of Natural Gas Science and Engineering*. 2022. Vol. 97, 104324.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-29-00202,
<https://rscf.ru/project/23-29-00202/>*

УДК 621.9

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПЫЛА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ФОРСУНКОЙ С ПРОТИВОВАЩЕНИЕМ

Хребтов М.Ю., Жерибор М.О., Мулладжанов Р.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В промышленных приложениях, связанных с распылом топлива (камеры сгорания, энергетические тепловые установки) в основном используются форсунки, оптимизированные для больших расходов топлива с высокими числами Вебера и Рейнольдса. С другой стороны, существует ряд приложений, таких как каталитический риформинг топлива в синтез-газ и водород [1-3], когда необходимо оптимизировать процесс распыла для режимов с небольшими расходами топлива, но с обеспечением высокой степени однородности смеси, необходимой для правильной работы катализатора. Для данных приложений необходима разработка новых типов форсунок, учитывающих особенности работы данных устройств.

В данной работе численным методом была исследована экспериментальная модель форсунки для риформера дизельного топлива, используемого для получения синтез-газа. Данная модель имеет два подводящих канала, создающих две области внутри форсунки с разными направлениями вращения (Рис. 1 а, б). Через данные каналы подводится перегретый водяной пар с температурой 450 °С. Топливо подводится через соосно расположенные каналы меньшего диаметра, расположенные внутри каналов для пара. Диаметр подводящих каналов для пара составляет 1 мм, каналов для топлива – 0.3 мм. Такая конфигурация приводит к образованию слоя с сильным сдвигом на разделительной кромке между областями (Рис. 1в), что способствует генерации турбулентности и усилению перемешивания и распада капель дизельного топлива.

Расход водяного пара задавался равным 350 г/час. Расход топлива (моделируемого n-гептаном) составлял 150 г/час.

Моделирование проводилось в открытом пакете OpenFoam (www.openfoam.com). Для газовой фазы разрешались уравнения Навье-Стокса в сжимаемой постановке. В связи с малым числом Рейнольдса в потоке ~1000 расчет проводился без явного задания модели турбулентности. Жидкая фаза моделировалась в как монодисперсный поток капель в лагранжевом представлении. Исследовался процесс испарения капель в зависимости от их диаметра. Исследовались три диаметра капель 50, 100 и 150 мкм. Для все трех диаметров получены хорошие показатели степени испарения топлива, до 70% по массе на выходном сечении сопла, что говорит об эффективности данной конфигурации форсунки.

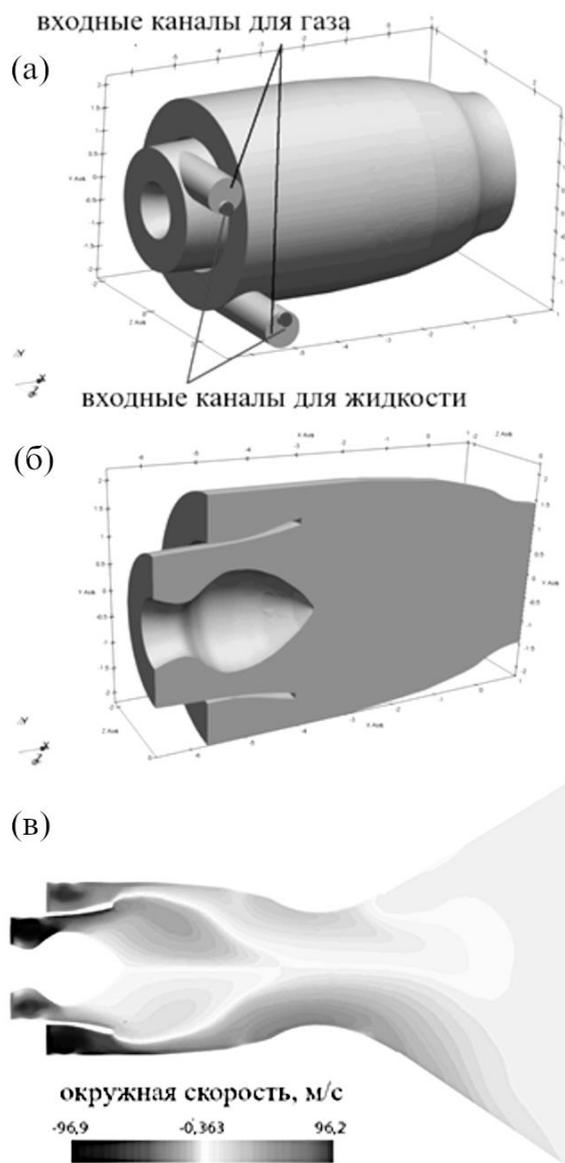


Рисунок 1. (а,б) – геометрия форсунки,
(в) – поле окружной скорости

Список литературы:

1. Zazhigalov S. V. et al. Simulation of diesel autothermal reforming over Rh/Ce0. 75Zr0. 25O2-δ-ηAl2O3/FeCrAl wire mesh honeycomb catalytic module //Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. 2020. Т. 150. С. 107876.
2. Porš Z. et al. Optimised mixture formation for diesel fuel processing //Fuel cells. 2008. Т. 8. №. 2. С. 129-137.
3. Pasel J. et al. Recent advances in diesel autothermal reformer design //International journal of hydrogen energy. 2020. Т. 45. №. 3. С. 2279-2288.

Исследование проведено за счет средств гранта
Президента МД-157.2022.4

УДК 532.51

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВОЛНОВЫХ РЕЖИМОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНКИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ, СТЕКАЮЩЕЙ ПО ВЕРТИКАЛЬНОМУ ЦИЛИНДРУ

Цвелодуб О.Ю.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящей работе исследуется возникновение трехмерных волновых режимов на поверхности пленки вязкой жидкости, стекающей по вертикальному цилиндру.

В случае малых расходов и больших сил поверхностного натяжения эта проблема сводится к исследованию одного уравнения для толщины пленки. В [1] при этих предположениях для цилиндров больших радиусов было получено одно нелинейное уравнение, которое для случая возмущений малой, но конечной амплитуд. После соответствующих преобразований оно принимает вид [2]:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} + 4H \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + S^4 \frac{\partial^2 H}{\partial \phi^2} + \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + S^2 \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right)^2 H = 0$$

Здесь

$$S = L / R = 1 / (1 + 0,8 \text{Re} / \text{We} \delta_0^2)^{1/2} < 1$$

Предположение об использовании цилиндров больших радиусов, означает, что справедливо неравенство $\delta_0 = h_0 / R \ll 1$. Полагается также, что выполнено условие длинноволновости возмущений, т.е. характерная длина возмущений свободной поверхности много больше толщины пленки – $\varepsilon = h_0 / L \ll 1$. Характерная скорость $V_0 = gh_0^2 / 2\nu$ с точностью до величин порядка ε равна скорости поверхности пленки при безволновом режиме течения. В результате проведенных преобразований уравнение (1) содержит один варьируемый параметр S , характеризующий геометрию цилиндра.

В случае аксиально–симметричных возмущений уравнение (1) переходит в широко известное уравнение Курамото–Сивашинского. Для пленочных течений оно впервые было получено Непомнящим в [3].

Из линейного анализа устойчивости тривиального решения следует, что оно неустойчиво к возмущениям вида

$$H \sim \exp(i\alpha(x - c\tau)) \{ \exp(in_\phi \phi) + \exp(-in_\phi \phi) \} + K.C.,$$

у которых волновые числа (α, n_ϕ) удовлетворяют условию:

$$\alpha^2 + S^4 n_\phi^2 - (\alpha^2 + S^2 n_\phi^2)^2 > 0$$

Здесь α – компонента волнового числа в направлении невозмущенного течения (ось x), n_ϕ – азиму-

тальная компонента волнового числа, $K.C.$ – комплексно-сопряженное выражение. Ясно, что n_ϕ принимает только целочисленные значения.

Для нейтральных волновых чисел $\alpha_{n1,2}$ справедливо выражение:

$$\alpha_{n1,2}^2 = (1 - 2S^2 n_\phi^2 \pm \sqrt{1 - 4S^2 n_\phi^2 (1 - S^2)}) / 2$$

Таким образом, для фиксированного значения S область неустойчивости представляет собой дискретный набор интервалов для волновых чисел α , соответствующих $n_\phi = 0, 1, 2, \dots$. Как известно (см., например [2]) пространственные стационарно бегущие периодические решения уравнения (1) отвечают тривиального решения, когда волновое число первой гармоники лежит в окрестности соответствующей нейтральной точки. Особого рассмотрения требует ситуация, если волновые числа сразу двух гармоник лежат в окрестностях нейтральных точек – $(0,5, n_\phi)$ и $(1,0, 0)$, что приводит к соответствующему резонансному эффекту. Это возможно только тогда, когда параметр S лежит в окрестности некоторых определенных значений. Одной из целей данной работы является получение модельной системы уравнений, описывающей эволюцию возмущений с волновыми числами, лежащими в окрестностях этих резонансных точек.

В результате получена модельная система уравнений, описывающую эволюцию пространственных симметричных по угловой координате ϕ возмущений с волновыми числами, лежащими в окрестностях особых резонансных точек. Рассмотрены несколько типов решений этой системы.

Список литературы:

1. T. Shlang, G.J. Sivashinsky Irregular flow of a liquid film down a vertical column // J.Phys. 1982 V.43 №43 P.459-466.
2. Бочаров А.А., Цвелодуб О.Ю. Волновые режимы течения вязкой пленки, стекающей по вертикальному цилиндру. // Известия РАН МЖГ. 2003. №2. С. 176-183.
3. Непомнящий А.А. Устойчивость волновых режимов в пленке, стекающей по наклонной плоскости / Непомнящий А.А. // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1974. № 3. С.28–34.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 122041400020-6)

УДК 551.594: 533.98

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСКУССТВЕННОГО АНАЛОГА ПРИРОДНОЙ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

Черемисин А. А.

Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, Институтская 3

Природа явления естественной шаровой молнии до сих пор не раскрыта. Наблюдениям, гипотезам о механизмах формирования природной шаровой молнии посвящено большое число работ. Рассматривают, в том числе, различные химические модели явления.

В 2000 году в г. Гатчине был обнаружен особый тип импульсного электрического разряда над водной поверхностью [1]. С момента своего открытия этот тип разряда привлекает большое внимание исследователей, поскольку при разряде формируется ярко светящееся шарообразное образование (названное плазмойдом). При этом время жизни светящегося шара довольно велико и может достигать 0.5 с при типичном времени гальванического контакта формирующегося плазмойда с электродами около 0.1 с. На этом основании шарообразный плазмойд рассматривают как аналог природной шаровой молнии.

Активные исследования образования и свойств шарообразного плазмойда, возникающего в результате разряда над водной поверхностью, проводят как в России, так и во многих зарубежных лабораториях (Китай, Япония, Германия, США, Чешская республика).

В докладе обсуждаются результаты исследования этого плазмойда различными методами. Во многих экспериментах большое внимание уделяется режимам тока разряда, обеспечивающего длительность свечения шара. Детали эволюции плазмойда исследователи отслеживали с помощью высокоскоростных видеокамер. Получены спектры свечения плазмойда в видимом диапазоне. Обнаружены линии эмиссии многих ионов металлов, которые экспериментаторы добавляли в воду в составе различных соединений. Изображения светящегося шара, полученные шпирен-методом. Представлены также инфракрасные спектры поглощения. Изучалось также влияние полярности электродов на образование плазмойда. Предложены гидродинамические модели формирования плазмойда. В целом, несмотря на активное исследование обсуждаемого явления, остаётся ещё множество нерешённых вопросов, касающихся структуры и состава плазмойда

Нами собрана установка для получения электрического разряда над водной поверхностью. Ёмкость вы-

соковольтной конденсаторной батареи – 1 мФ. Батарея заряжалась до напряжения 5.5 кВ от высоковольтного источника, в батарее запасалась энергия ~15 кДж.

С помощью высокоскоростной видеокамеры было обнаружено, что при высоковольтном (5.5 кВ) разряде над водной поверхностью в системе, в которой один электрод погружён в воду, а другой, изолированный, на несколько миллиметров выступает из воды, образуется шарообразный плазмойд, в эволюции которого выделяются, по крайней мере, три этапа. На первом, длящемся 0.5–1 мс, на поверхности воды развиваются стримеры. На втором, длящемся примерно 100 мс, происходит разряд тока и формируется ярко светящийся шарообразный плазмойд с плазменной ножкой. На третьем этапе плазмойд развивается без подпитки внешней энергией, медленно всплывает вверх и через 0.5–0.6 с перестаёт ярко светиться. Показано, что при прохождении лазерного пучка через плазмойд отчётливо наблюдается рассеяние лазерного излучения на аэрозольных частицах разного размера [2]. Установлено, что внутренность плазмойда заполнена водным аэрозолем, содержащим две фракции – одна состоит из частиц субмиллиметрового диапазона, другая содержит среднелдисперсный аэрозоль. Наличие водного аэрозоля указывает на важную роль парообразования и диспергирования воды вблизи и на поверхности внутреннего электрода в момент краткого, но интенсивного разряда, а также на конденсационные процессы внутри шарообразного плазмойда. Возможно, наличие большого количества водного аэрозоля свойственно и природным шаровым молниям, что должно являться следствием генерации достаточно большого количества водяного пара, который, вероятно, также образуется при ударе обычной молнии в обводнённую поверхность.

Список литературы

1. Шабанов Г.Д. О возможности создания природной шаровой молнии импульсным разрядом нового вида в лабораторных условиях // Успехи физических наук. 2019. Т.189. №1. С.95-111.
2. Черемисин А.А., Исаков В.П., Шишкин Е.А., Онищук А.А., Пармон В.Н. Водный аэрозоль в искусственном аналоге природной шаровой молнии // Вестник РАН. 2023. Т.93. № 2. с. 171-178.

УДК 532.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМКНУТОГО ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Шарифуллин Б.Р.¹, Наумов И.В.^{1,2}, Тингулова М.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Исследование формирования вихревых структур для улучшения тепло-массообменных процессов в биологических и энергетических технологиях является важнейшим приложением в разработке вихревых аппаратов и оптимизации рабочих режимов [1]. Например, при разработке биореакторов особое внимание уделено эффективности массообмена для повышения продуктивности клеточных культур и тканей, а также увеличения скоростей биосинтеза целевых продуктов первичного и вторичного метаболизма микроорганизмов [2, 3]. В данной работе выполнено экспериментальное исследование распределения скорости при организации вихревого движения жидкости в цилиндрическом контейнере с нижним вращающимся торцом (диском) в двух конфигурациях: при свободной верхней границе раздела (I) [4], при наличии второй более легкой несмешиваемой жидкости (II) [5]. Для сравнения исследования были проведены в газ-вихревом биореакторе (III) с плавающей шайбой на поверхности жидкости. Цель работы – исследовать структуру замкнутого вихревого течения при различных граничных условиях.

Исследования проводились в вертикальном цилиндрическом контейнере (радиус $R = 144$ мм) с нижним диском, вращающимся с угловой скоростью ω и в газ-вихревом биореакторе (радиус $R = 95$ мм) с плавающей шайбой на поверхности жидкости. В качестве рабочей жидкости использовался 65% водный раствор глицерина (плотность $\rho_g = 1150$ кг/м³, кинематическая вязкость $\nu_g = 15$ мм²/с). В качестве второй жидкости использовалось подсолнечное масло ($\rho_o = 916$ кг/м³, $\nu_o = 41,9$ мм²/с). Высота слоя рабочей жидкости h_g менялась от $0,2R$ до $1R$ с шагом $0,2R$, а высота верхней жидкости была фиксирована $h_o = 1R$. Число Рейнольдса $Re = \omega R^2/\nu_g$ варьировалась от 200 до 1000. Исследования проводились при помощи метода PIV в горизонтальном сечении под границей раздела на расстоянии 1 мм, а также вблизи шайбы и дна в биореакторе. Поток жидкости засеивался полиамидными частицами плотностью 1030 кг/м³ и средним размером 10 мкм.

В ходе работы определены зависимости формирования циркуляционного движения при увеличении закрутки потока и изменении высоты рабочей жидкости. Показано, что в биореакторе (III) при малой высоте заполнения емкости рабочей жидкостью наблюдается меридиональная циркуляция во всем объеме. В то же время в цилиндрическом контейнере со свободной поверхностью (I) вблизи оси наблюдалась зона с

нулевой радиальной компонентой скорости, следовательно, меридиональная циркуляция формируется не во всем объеме цилиндра, а только вблизи стенок. При увеличении высоты столба жидкости область, в которой отсутствует радиальная составляющая, уменьшается. Получено, что для эффективного перемешивания и циркуляции жидкости во всем объеме необходимо, чтобы высота слоя жидкости была не менее $1R$. Связано это с тем, что в случае свободной границы раздела градиента давления, возникающего вдоль боковой стенки и границы раздела, недостаточно для циркуляции всего объема жидкости. Но при наличии сверху второй жидкости (II), даже при $h_g = 0,2R$, в рабочей жидкости формируется такое же меридиональное течение как в конфигурации с твердой крышкой. Твердая крышка твердотельного вращения не допускает и возникает меридиональная циркуляция, тогда как жидкая крышка – промежуточный случай, а результат зависит от ее вязкости.

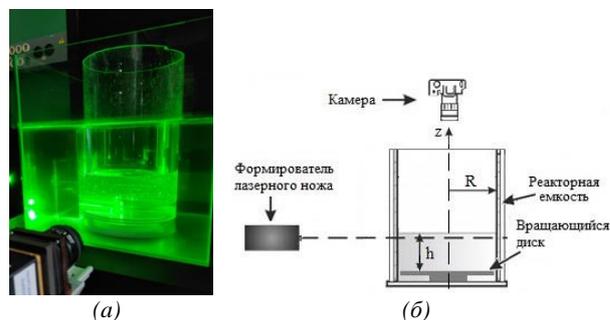


Рис. 1. Фотография (а) и схема установки (б).

Список литературы:

1. Shtern V. Cellular Flows. Topological Metamorphoses in Fluid Mechanics // New York: Cambridge University Press. 2018. 584 p.
2. Мертвецов Н., Рамазанов Ю., Репков А., Дударев А.Н., Кислых В. Газовихревые биореакторы "Биок": Использование в современной биотехнологии // Новосибирск: Новосибирское отделение издательства "Наука". 2002. 118 с.
3. Наумов И.В., Геворгиз Р.Г., Скрипкин С.Г., Шарифуллин Б.Р. Экспериментальное исследование формирования вихревой структуры в газ-вихревом биореакторе // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 5. С. 719-724.
4. Chaplina T.O. Experimental study of substance transfer in vortex and wave flows in multicomponent media // In Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. 2018. Springer, Cham. 2019. p.159-173.
5. Skripkin S.G., Sharifullin B.R., Naumov I.V., Shtern V.N. Dual vortex breakdown in a two-fluid whirlpool // Scientific Reports. 2021. V.11. 23085

УДК 532.5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА КРЕМНИЯ НА РЕЖИМЫ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В Y-ОБРАЗНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Шебелева А.А.¹, Минаков А.В.^{1,2}, Пряжников А.И.¹, Шебелев А.В.^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет,

660074, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

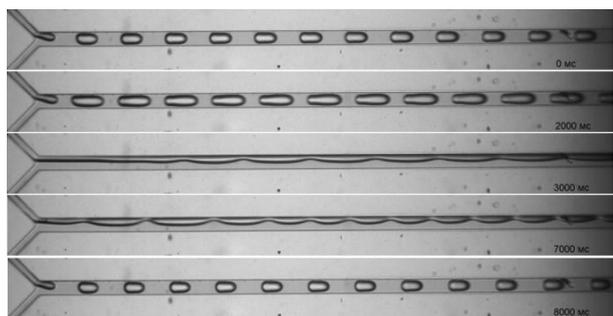
Проведено экспериментальное исследование режимов течения жидкостей в прямом Y-образном микроканале. Были исследованы следующие жидкости: вода, нефть и суспензия на основе воды с массовой концентрацией оксида кремния 1%. Предварительно были измерены свойства исследуемых жидкостей (табл. 1). Экспериментальное исследование проведено на чипе с Y-образным микроканалом, изготовленным из полимера (ПДМС) методами безмасочной литографии и анизотропного реактивно-ионного травления. Поперечные размеры входных каналов составляли 40x40 мкм, выходных каналов 40x80 мкм, что соответствует гидравлическому диаметру 53,3 мкм. Длина входного канала равнялась 3000 мкм, выходного 10000 мкм.

Табл. 1. Физические свойства жидкостей.

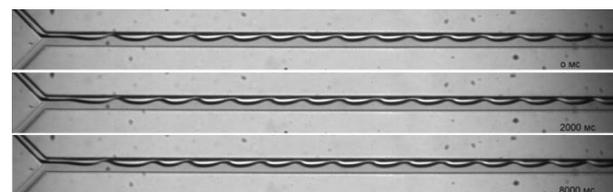
Параметр	Нефть	Вода	Суспензия SiO ₂ , n=1%
ρ, кг/м ³	826	997	1002,5
μ, кг/м*с	0,00847	0,00089	0,0009
σ, кг*м ² /с ²	0,0224	0,0224	0,015

Эксперименты проводились в широком диапазоне расходов жидкостей $8,3 \times 10^{-12} \leq Q \leq 8,3 \times 10^{-10}$ м³/с, что обеспечило широкий диапазон чисел Рейнольдса, чисел Вебера и капиллярного числа. Эксперимент проводился при фиксированном значении расхода нефти и варьируемом расходе жидкостей.

Разница в характере течений при равном значении расходов для разных наборов жидкостей представлена на рис.1. Картины течений представлены в сходные моменты времени.



а) Нефть $Q_o=1,3 \times 10^{-10}$ м³/с и вода $Q_w=3,3 \times 10^{-10}$ м³/с



б) Нефть $Q_o=1,3 \times 10^{-10}$ м³/с и суспензия $Q_s=3,3 \times 10^{-10}$ м³/с

Рис. 1 Картины течения для разных наборов жидкостей при равном значении расходов.

В случае, когда по микроканалу подается вода и нефть (рис. 1 а), формируется переходная область, где капельный режим переходит в параллельный. Капли воды увеличиваются в размере до того момента, при котором сталкиваются и сливаются в единый поток. Данный поток начинает колебаться до тех пор, пока струя не разрывается на маленькие капли, которые в дальнейшем увеличиваются в размере, и картина течения не повторится. В случае, когда по микроканалу подается суспензия и нефть (рис. 1 б), отрыв капель не наблюдается, поверхность между жидкостями колеблется на протяжении всего эксперимента.

Уменьшение расхода суспензии $8,3 \times 10^{-12} \leq Q_s \leq 1,7 \times 10^{-10}$ м³/с приводит к формированию капельного режима течения. В этом режиме поток нефти (подается снизу) отрывает отдельные капли от струи суспензии (подается сверху). С увеличением расхода суспензии размер капли увеличивается, а расстояние между каплями уменьшается.

В ходе эксперимента установлены следующие режимы течения: снарядный, параллельный, капельный. Было выявлено, что между режимами существует переходная область, в границах которой режим не являлся установившемся, а происходит циклическая смена одного режима на другой. Установлено, что при добавлении наночастиц оксида кремния с массовой концентрацией 1% существенно смещаются границы между различными режимами двухфазного течения в рассматриваемом микроканале. Так, при расходе нефти $Q_o=3,3 \times 10^{-11}$ м³/с границы переходной области между нефтью и водой находятся в следующем диапазоне чисел Рейнольдса $1,24 \leq Rew \leq 1,86$, а для набора жидкостей нефть и суспензия в $1,86 \leq Res \leq 4,64$. При расходе нефти $Q_o=1,3 \times 10^{-10}$ м³/с границы переходной области между нефтью и водой находятся при числе Рейнольдса $Rew=6,2$, между нефтью и суспензией $Rew=4,64$.

Для каждого из наборов жидкостей построены карты режимов по расходу. Относительное положение режимов на картах совпадает, однако границы режимов сдвинуты относительно друг друга на несколько порядков.

Список литературы:

1. M. Pryazhnikov, A. Minakov, D. Guzei, A. Pryazhnikov, A. Yakimov. Flow Regimes Characteristics of Water-crude Oil in a Rectangular Y-microchannel // J. Appl. Comput. Mech. 2022. V. 8(2). p. 655-670, 2022.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (номер FSRZ-2020-0012)

УДК 533.6.011, 504.3.054, 69.032.22

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕТРОВЫХ ЗОН В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛЕЙ ЗДАНИЙ РАЗНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Шульженко П.Д.¹, Мешкова В.Д.¹, Дектерев А.А.^{1,2}

¹ Сибирский Федеральный Университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

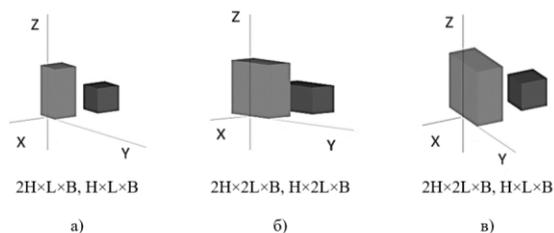
² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Здания и микрорайоны, изменяют естественный ландшафт местности, что приводит к изменению движения потоков ветра в пределах городского пространства, что способствует снижению аэрационного режима и ухудшает экологическую обстановку в современных городах.

В пределах города воздушные массы постоянно сталкиваются со зданиями, образуя при их обтекании различные ветровые зоны. Как правило, за зданием формируется аэродинамическая тень, а при обтекании граней и кровли в результате срыва вихрей и поджигания потока происходит формирование локальных зон ускорения [1]. Исходя из этого, цель исследования заключается в изучении формирования ветровых зон в результате обтекания потоком воздуха тандема зданий разной геометрической формы.

Численное моделирование осуществлялось с использованием программного комплекса SigmaFlow [2]. Исследование проводилось с помощью метода вычислительной гидродинамики. В расчете использовалась микромасштабная численная модель атмосферы городской среды, основанная на нестационарных осреднениях по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса для несжимаемых течений с переменной плотностью, которая включает в себя уравнения неразрывности, движения и сохранения энергии. В качестве базовой модели турбулентности используется двухпараметрическая модель $k-\omega$ SST [3]. Скорость набегающего потока была равна 5 м/с. Число Рейнольдса равно 5×10^4 .

В исследовании рассматривались три варианта постановки задач для тандемного расположения (см. рис. 1).



Примечание:
H (высота) = L (длина) = B (ширина) = 50 мм;
h (расстояние между объектами) = 50 мм;
Первая модель по потоку высотное здание, за ним малоэтажное здание

Рис. 1. Варианты расчетных моделей:
а) Вариант 1; б) Вариант 2; в) Вариант 3.

В качестве примера представлены результаты исследования тандема зданий разной геометрической формой. Была выявлена закономерность образования вихрей в области между моделями, зависящая от длины исследуемых объектов.

Стоит отметить, что длина здания определяет структуру формируемых вихрей между ними. В данной области образуется зона рециркуляции с пониженными скоростями ветра, что является частью аэродинамической тени.

Так же можно отметить, что при лобовом столкновении потока с первым зданием в тандеме (см. рис. 2), скорость потока при обтекании узкого здания больше, чем скорость потока при обтекании широких зданий. Можно сделать вывод, что ширина обтекаемого здания влияет на скорость потока.

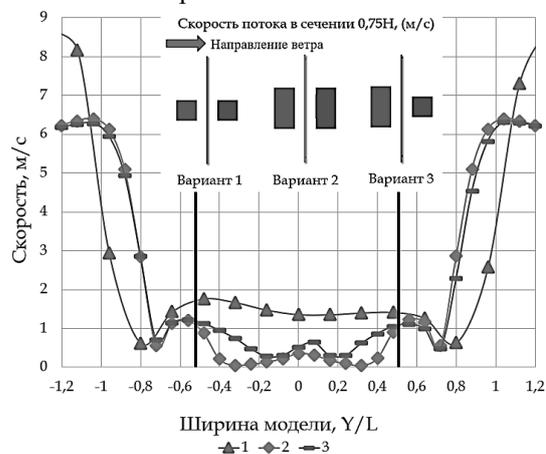


Рис. 2. Результаты сравнения скорости потока при обтекании разных моделей.

Полученные результаты показали, что длина исследуемого объекта влияет на форму и расположение рециркуляционных вихрей между моделями, а также на скорость ветрового потока после обтекания зданий. Увеличение ширины первого здания формируют более строгие вихревые структуры, в тоже время, если второе здание меньшей длины, четкость вихрей теряется.

Список литературы:

1. Лейкин И.Н., Рассеивание вентиляционных выбросов химических предприятий (проектирование и расчет) / И. Н. Лейкин. // Химия. 1962. С.17.
2. Filimonov S.A. Analysis of vortex structures formed in the winter in the atmosphere of Krasnoyarsk city / Filimonov S.A., Meshkova V.D., Dekterev A.A. and et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2088. 1. P.1-8.
3. Menter F.R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows // AIAA Paper. 1993. No. №93-2906. P.21.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-61-00098,
<https://rscf.ru/project/22-61-00098/>
Участие в конференции осуществлено при
поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд
поддержки научной и научно-технической
деятельности» №20230622-03912

УДК 532.517; 532.52

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ МИКРОСТРУЙ ЛЕТУЧЕЙ ЖИДКОСТИ В РАЗРЕЖЕННОЙ СРЕДЕ

Яскин А.С.¹, Зарвин А.Е.^{1,2}, Каляда В.В.¹, Дубровин К.А.^{1,2}, Художитков В.Э.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

² Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследования истечения струй жидкости имеют большую предысторию. Однако на проблемы истечения жидкостей, в частности, микроструй, в вакуум до недавнего времени не было обращено достаточного внимания. Истечение жидкости в сильно разреженную среду в отличие от истечения в плотную газовую среду сопровождается рядом особенностей, обусловленных, прежде всего, влиянием на форму струи процесса испарения и поверхностного натяжения. Если давление насыщенных паров капельной жидкости при температуре истечения выше давления среды, то истекающая жидкость оказывается в состоянии перегрева и может испытывать взрывное испарение. В зависимости от степени перегрева струйное истечение сопровождается разрывом струи из-за роста пузырьков пара, распадом струи на капли или облако капель, фазовым переходом с образованием ударных волн [1, 2].

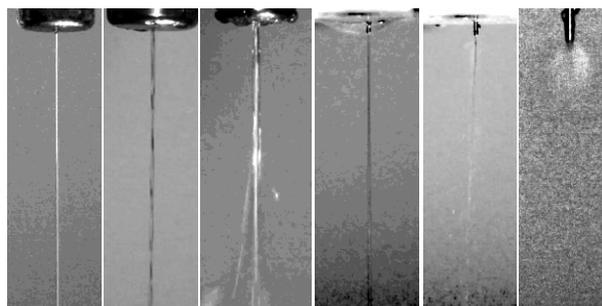
Целью настоящей работы является исследование формы струйного истечения этанола из отверстий и тонких капилляров в среду с контролируемой степенью разрежения.

Исследования выполнены на газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 [3]. Система вакуумирования стенда обеспечивала в камере расширения объемом 460 л высокое разрежение (до 0,1 Па) остаточного газа. При стационарном истечении жидкости давление в камере расширения P_b зависело от диаметра выходного отверстия используемого сопла, но не превышало 15 Па. Наблюдение и фотографирование струй исследуемой жидкости осуществлялось через оптическое окно. Протяженность участка наблюдения при макросъемке в вертикальные и горизонтальные направления составляла около 60 мм. Дополнительно стенд был оснащен системой подготовки и подачи жидкости к соплу, которое монтировалось в сопловой блок, установленный на координатном устройстве стенда. Система подготовки и подачи жидкости в сопло включала в себя камеру заливки и дегазации жидкости, камеру задания и регулирования давления, камеру термостатирования рабочей жидкости, а также приборы и оборудование управления подачей жидкости в сопло.

В работе использованы сопла в виде отверстия диаметром D^* с острой кромкой и виде цилиндрического канала (капилляра) с большим отношением длины L к диаметру отверстия D^* . Сопло соединялось полипропиленовой трубкой с сосудом с исследуемой жидкостью, размещенным вне вакуумной установки. Температура жидкости в сосуде и температура нагреваемого сопла контролировались цифровыми термометрами сопротивления с разрешением 0,1 К. Перепад давления на сопле определялся как разница давлений над жидкостью в сосуде P_0 и остаточным противодавлением в камере расширения P_b . При исследовании

струй жидкости, истекающих при атмосферном давлении, вакуумная камера наполнялась воздухом, а в камере с жидкостью создавалось избыточное над атмосферой давление. Для реализации режимов течения жидкости при перепадах давления менее 100 кПа сосуд подсоединялся к системе вакуумной откачки. Измерения производились в вертикальном (сверху вниз) направлении течения микроструй.

В докладе приведены результаты и особенности течения этанола в вакуум. Некоторые характерные черты обсуждаемых течений оказаны на рисунке. Из приведенных фотографий истечения из круглого отверстия (рис. а, б, в) и капилляра (г, д, е) при разных диаметрах выходного отверстия (200 мкм (а, б, г, д) и примерно в три раза больше (в, е)) видно, что истечение из отверстий малого диаметра стабильно на большем расстоянии. Обсуждены причины обнаруженных бифуркаций.



(а) (б) (в) (г) (д) (е)

Рис. Струйное истечение этанола из отверстий диаметром (а), (б) $d = 0,2$ мм, (в) $d = 0,7$ мм и капилляров диаметром (г), (д), $d = 0,2$ мм, (е) диаметром $d = 0,53$ мм $P_0 = 100$ кПа, $T_0 = 298$ К. $P_b = 100$ кПа (а), (г), $P_b = 2$ Па (б), $P_b = 13$ Па (в), $P_b = 11$ Па (д), $P_b = 8$ Па (е).

Список литературы:

1. Vieira M.M. and Simões -Moreira J.R. Low-pressure flashing mechanisms in iso-octane liquid jets J. Fluid Mech. 2007. v.572, pp.121–144. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S0022112006003430>
2. Kurschat TH, Chaves H, Meier GEA. Complete adiabatic evaporation of highly superheated liquid jets. J.Fluid.Mech. 1992. v.236. pp.43-59. doi:10.1017/S0022112092001332
3. Zarvin A.E., Kalyada V.V., et al. Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. V. 45. Issue 5. P. 819-827. doi: 10.1109 / TPS.2017.2682901.

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Прикладная физика» НГУ при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-19-00750)

УДК 536.242

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕСЫХАНИЯ И КРИЗИСА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ БИНАРНОЙ СМЕСИ R32-R134A В МИКРОКАНАЛАХ

Шамирзаев А.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Микроканальные теплообменники с кипящим потоком являются эффективными устройствами охлаждения теплонапряженного оборудования и электроники. В условиях высоких тепловых потоков возможно достижение критических тепловых потоков, приводящее к существенному снижению теплоотдачи и повышению температуры. Чтобы предотвратить такие ситуации, важно понимать механизмы, которые приводят к кризису. При кипении насыщенной жидкости в микроканалах наиболее вероятными механизмами ухудшения теплообмена является возникновение сухих областей на поверхности теплообмена [1], или подавление кипения в тонких плёнках жидкости вследствие высокого трения на межфазной поверхности [2]. В то же время использование зетропных смесей может препятствовать развитию сухих областей [3] и таким образом приводить к увеличению критических тепловых потоков. В данной работе проведено экспериментальное исследование условий ухудшения теплоотдачи и зависимости критического теплового потока от массового расхода в условиях насыщенного кипения зетропной смеси в системе микроканалов.

Эксперименты проведены на теплообменнике изготовленном из медного блока марки М1 с вмонтированными нагревателями на верхней части которого фрезерованы 2 микроканала длиной 16 мм и сечением 2x0,2 мм. Эксперименты выполнены в диапазоне массовых скоростей от 250 до 1500 кг/м²с и тепловых потоков от 170 до 1500 кВт/м² при абсолютном давлении в системе 11 бар. Подробное описание экспериментальной установки и методики измерений представлено в работе [4]. В качестве рабочей жидкости использована зетропная смесь R32-R134a при массовой концентрации исходной смеси 49%- 51%.

В начале каждой серии экспериментов в участке фиксировался тепловой поток и на вход подавался слабо недогретый поток смеси с G=1500 кг/м²с. В ходе серии массовая скорость уменьшалась вплоть до достижения критического теплового потока. Типичная зависимость коэффициентов теплоотдачи от выходного паросодержания представлена на рис.1, начало пересыхания определялось по увеличению температуры на выходе из участка. Анализ данных показал – начало образования сухих пятен соответствует условию $\delta^+ = 30$, где $\delta^+ = \delta \sqrt{\tau_0 / \rho} / \nu$ безразмерная толщина равномерной волновой плёнки жидкости определённой по [5].

Полученная зависимость критического теплового потока от массовой скорости показана на рис.2. В исследованных условиях критический тепловой поток соответствует полному испарению жидкости до массовой скорости 500 кг/м²с.

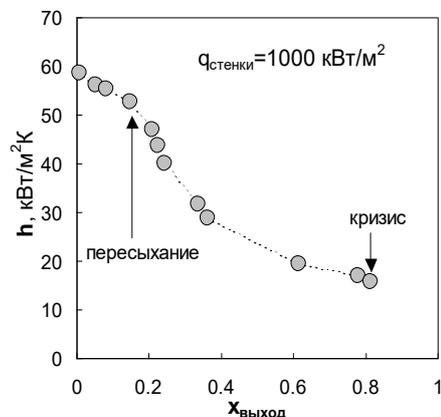


Рис.1. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от выходного паросодержания при тепловом потоке 1000 кВт/м².

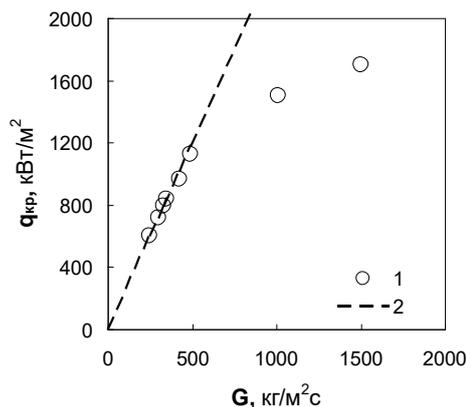


Рис.2. Зависимость критического теплового потока от массовой скорости. Точки – эксперимент, линия – полное испарение.

Список литературы:

1. Jige D. et al. Flow boiling in horizontal multiport tube: Development of new heat transfer model for rectangular minichannels // International J. of Heat and Mass Transfer. 2019. Т.144. 118668.
2. Kuznetsov V. V., Shamirzaev A. S. Flow boiling heat transfer of refrigerant R-134a in copper microchannel heat sink // Heat Transfer Engineering. 2016. Т. 37. №. 13-14. С. 1105-1113.
3. Oliveira G. H. S. et al. Flow boiling of hydrocarbons and their zeotropic binary mixtures under pre-and post-dryout conditions // Applied Thermal Engineering. 2021. Т. 198. С. 117483.
4. Kuznetsov V. V., Shamirzaev A. S. The influence of the mass flow rate on the critical heat flux during subcooled deionized water boiling in a microchannel cooling system // Technical Physics Letters. – 2018. Т. 44. №. 10. С. 938-941.
5. Butterworth D. An analysis of film flow and its application to condensation in a horizontal tube // International Journal of Multiphase Flow. 1974. Т. 1. №. 5. С. 671-682.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 22-29-00168 (<https://rscf.ru/project/22-29-00168/>)

СЕКЦИЯ 5

Тепломассообмен при фазовых переходах

УДК 536.46

ДИФфуЗИОННО-КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПРОЦЕССЫ ФАЗОБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ Ti+Al+Fe₂O₃+(Fe+C) В УСЛОВИЯХ РЕАКЦИОННОГО СПЕКАНИЯ

Анисимова М.А., Князева А.Г., Коростелева Е.Н., Николаев И.О.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4

Переход на новый технологический уклад неразрывно связан с использованием новых классов материалов. Приоритет в этой области принадлежит композиционным материалам, технологиям их производства и продукции с их использованием. Использование при реакционном спекании в качестве исходных многокомпонентных смесей, в которых возможно получение соединений с принципиально разной структурой и свойствами, может привести к формированию уникальных новых свойств материалов и, в перспективе, к разработке соответствующих технологий. Наиболее интересным в этом направлении является попытка применения в многокомпонентных смесях переработанных отходов или побочных продуктов металлообработки (металлическая стружка) строительных предприятий.

В экспериментальных исследованиях обнаружено, что после процедуры окисления и измельчения стружка может представлять собой сложный конгломерат частиц с широким диапазоном дисперсности и морфологии, на поверхности которых неравномерно распределены оксидные включения и углерод. Их присутствие отчетливо заметно на спеченных в вакууме прессовках (см. рис.1).



Рис.1 Микроструктура спеченной в вакууме при 800°C прессовки из измельченной и окисленной стружки стали 45.

Очевидно, что взаимодействие такого компонента с титаном и алюминием в условиях реакционного спекания носит чрезвычайно сложный и многостадийный характер. Результаты анализа структуры спеченных образцов порошковых композиций (Ti+Al)+Fe/Fe₂O₃/C) показали, что в зависимости от соотношения компонентов, возможно формирование неравновесного твердого раствора на основе α-Ti, куда диффундирует алюминий, кислород и возможно, углерод из обработанной стружки. На границах частиц стружки при контакте с алюминием возможно формирование неравновесной фазы AlFe₂. Также присутствует свободное железо, которое можно рассматривать и как непрореагировавшее, и как продукт реакции восстановления.

Объяснение наблюдаемых закономерностей возможно с привлечением диффузионно-кинетических моделей, типичных для теории реакционной диффузии.

Поскольку металлическая стружка - специфический объект, для изучения ее взаимодействия с титаном и алюминием можно ограничиться одномерными задачами в декартовой системе координат (см рис. 2). Железная стружка, возможно содержащая примесь углерода и частично окисленная, взаимодействует с титаном и алюминием по механизму реакционной диффузии. Первыми вследствие реакции замещения появляются оксиды алюминия и титана. Высвободившееся железо взаимодействует с алюминием и титаном с образованием интерметаллидных фаз. Полагая, что размер окисленной стружки остается неизменным, приходим к задаче с четырьмя подвижными границами. Наличие углерода может приводить к появлению перекрестных диффузионных потоков и влиять на область существования фаз.

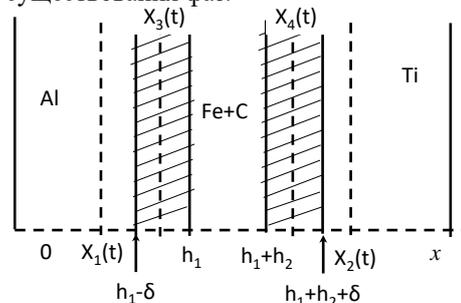


Рис.2 Взаимное расположение границ раздела на начальной стадии взаимодействия частично окисленной стружки с алюминием и титаном.

Диффузионно-кинетическая задача решается аналитически в квазистационарном приближении. В результате находятся распределения концентраций и уравнения для подвижных границ, которые решаются численно. Модель корректна до тех пор, пока свободные алюминий и титан не дойдут до области, которая первоначально содержала только железо и углерод, что приведет к появлению еще как минимум двух подвижных границ. Эта модель на уровне взаимодействия частиц позволяет оценить механические напряжения в окрестности растущих фаз.

На макроскопическом уровне более общей является модель реакционного спекания, учитывающая стадии нагрева, химического превращения и остывания с сопутствующим изменением пористости. Поскольку частицы распределены по всему объему прессовки, уравнение баланса тепла в модели дополняется системой кинетических уравнений, соответствующих формированию фаз, наблюдаемых в эксперименте, и возможных промежуточных продуктов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда и субсидии Администрации Томской области, грант № 22-13-20031, <https://rscf.ru/project/22-13-20031/>

УДК 53.46

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО СИНТЕЗА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО КОМПОЗИТА С РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ ОПИСАНИЯ КИНЕТИКИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ

Анисимова М.А., Чумаков Ю.А., Князева А.Г.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
6340055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4

В настоящее время большой интерес вызывают подходы к моделированию синтеза новых материалов, для которых используют термины: многоуровневое (multilevel), многомасштабное (multiscale) и мультифизическое (multi-physical) моделирование. Цель настоящей работы состоит в сравнении двух подходов к моделированию синтеза покрытия из порошков Ti и Al на подложке при управлении процессом подвижным тепловым источником.

В простейшем случае образца в форме тонкой двухслойной пластины и внешнего источника тепла, однородно распределенного вдоль одной из координатных осей на плоскости и движущегося с заданной скоростью вдоль другой оси в этой же плоскости, тепловая часть задачи сводится к одномерному уравнению теплопроводности

$$U \frac{\partial T}{\partial t} + c_B \rho_B u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(W \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{W_{ext} + W_{ch} - H(T)}{h_A + h_{B0}},$$

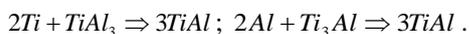
где

$$W = \lambda_A \frac{h_A}{h_A + h_{B0}} + \lambda_B \frac{h_B}{h_A + h_{B0}};$$

$$U = c_A \rho_A \frac{h_A}{h_A + h_{B0}} + c_B \rho_B \frac{h_B}{h_A + h_{B0}} (1 - \theta) -$$

эквивалентный коэффициент теплопроводности и эквивалентная объемная теплоемкость; $\lambda_A, \lambda_B(\theta)$ - коэффициенты теплопроводности; c_A, ρ_A, c_B, ρ_B - теплоемкости и плотности подложки (А) и покрытия (В); $h_A, h_B(\theta)$ - толщины слоев; W_{ext} - внешний источник тепла; функция $H(T)$ описывает потери тепла конвекцией и излучением; второе слагаемое в левой части появляется при условии усадки порошкового слоя; θ - пористость, изменяющаяся в соответствии с некоторым кинетическим законом. На торцах пластины источник и стоки тепла отсутствуют. В начальный момент времени $h_B = h_{B0}$; $\theta = \theta_0$; $T = T_0$. В некотором интервале температур возможно плавление, которое учитывается через теплоемкость. Химическое тепловыделение W_{ch} определяется последовательностью химических превращений, что может быть описано разными способами.

Первый способ состоит в формальном описании последовательности реакций на основе классической кинетики. Для системы Ti-Al в кинетической модели учитываются следующие обратимые и необратимые стадии:



Предполагается, что скорости реакций зависят от температуры по закону Аррениуса, а от концентраций – в

соответствии с законом действующих масс. В результате определяем состав композитного покрытия в зависимости от условий синтеза. Получаемые массовые концентрации интерметаллидов легко перевести в объемные доли.

Второй способ описания фазообразования приводит к двухуровневой модели, в которой разделение по уровням описания связано с разделением физических процессов. Предполагается, что механизм реакций образования интерметаллидов является преимущественно диффузионным и имеет место на мезо уровне, для которого определяется условная мезо ячейка, в центре которой располагается тугоплавкая частица. При достижении температуры плавления алюминия ускоряются диффузия и химические реакции. Модель реализована для условных ячеек двух типов – с формированием области, содержащей некоторый суммарный интерметаллид Ti_xAl_y и с последовательным образованием фаз $Ti_3Al, TiAl, TiAl_3$ (см. рис.1). В любом случае для каждой реакционной ячейки, соответствующей некоторой точке макрообразца, мы приходим к задаче с подвижными границами в локальной (внутренней) системе координат. Таким образом, задача в целом становится двумерной.

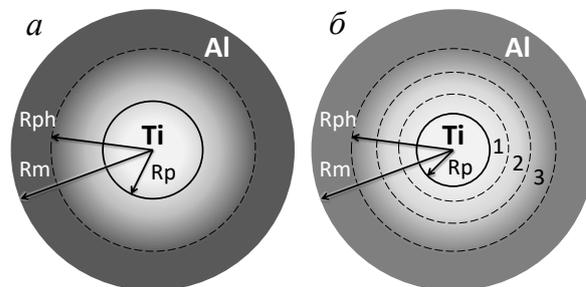


Рис.1. Условные реакционные ячейки с образованием одной (а) и трех (б) фаз.

Поскольку представление о реакционной ячейке является условным, для упрощения вычислений применяется приближенный подход к диффузионно-кинетическим задачам. Эти задачи решаются в квазистационарном приближении, на основе которого в каждой ячейке находится распределение концентраций алюминия и титана, положение границ раздела фаз и объемные доли всех фаз в ячейках в произвольный момент времени, соответствующие объемным долям фаз в каждой точке макрообразца.

Сравнение подходов осуществляется по изменению суммарных объемных долей интерметаллидов и по поведению температуры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 22-11-00100, <https://rscf.ru/project/22-11-00100/>

УДК 532.5

НАГРЕВ И ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ СФЕРОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ

Антонов Д.В.¹, Долгих В.В.¹, Сажин С.С.^{2,3}, Стрижак П.А.¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

³ University of Brighton, United Kingdom

Предложена математическая модель нагрева и испарения капель с учетом их сфероидальной формы. Эта модель учитывает влияние конечной теплопроводности жидкости и основана на аналитическом решении уравнения теплопроводности для газовой фазы [1, 2]. Уравнение энергии решается численно с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Типичные поля температуры для случая капель в форме вытянутых (а) и сплюснутых (б) эллипсоидов, полученные по результатам численного моделирования, представлены на рис. 1. Численные расчеты проводились в диапазонах размеров капель от 0.1 мм до 1 мм, температур газа от 500 К до 1000 К, степени несферичности капель от 1/5 до 5. Показано, что время жизни сфероидальных (вытянутых и сплюснутых) капель меньше, чем у сферических капель того же объема.

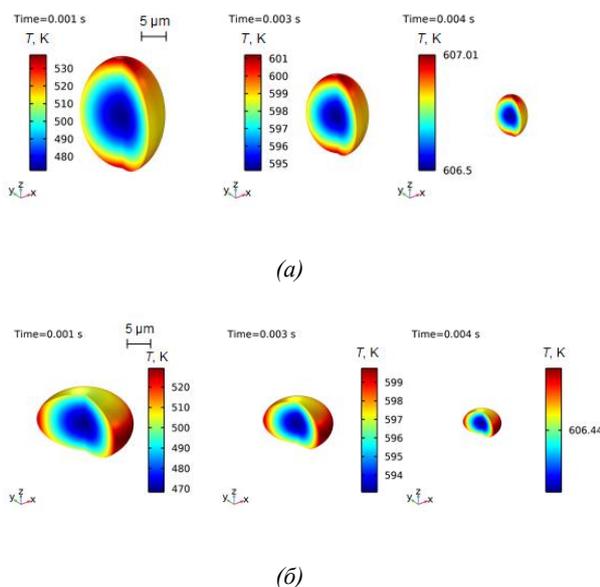


Рис. 1. Типичные поля температуры для случая капель в форме вытянутых (а) и сплюснутых (б) эллипсоидов, полученные по результатам численного моделирования.

Экспериментальные исследования характеристик нагрева и испарения капель монокомпонентных топлив (н-додекана, н-декана, н-гептана) сфероидальной формы проведены в акустическом поле левитатора с возможностью управления степенью несферичности объектов исследований. Типичные видеокadres из опытов представлены на рис. 2. Особенности динамики испарения капель сфероидальной формы регистрировались с помощью высокоскоростной камеры

Phantom MIRO M310. Полученные данные обрабатывались с использованием собственных алгоритмов обработки изображений в программном обеспечении MATLAB.

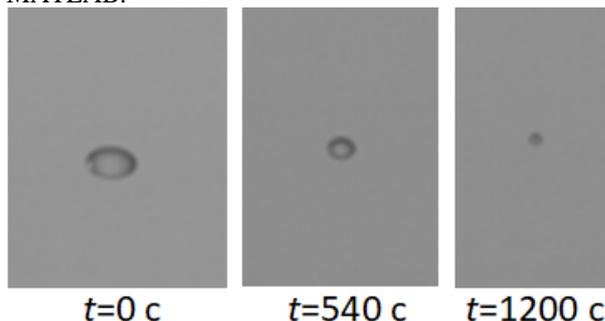


Рис. 2. Типичные видеокadres из экспериментов.

Установлено удовлетворительное согласование результатов численного моделирования и экспериментов по динамике испарения капель сфероидальной формы. Показано, что, как и в случае стационарных сферических капель, d^2 -закон выполняется и для случаев сфероидальных капель (как вытянутых, так и сплюснутых) на финальном этапе испарения. Максимальные температуры поверхности капель наблюдаются на полюсах, где кривизна поверхности максимальна

Полученные результаты являются научными основами для разработки и модернизации перспективных высокотемпературных газопарокапельных приложений, а также развития и совершенствования существующих. К ним относятся: топливные технологии, а именно точные устройства и дизельные двигатели (использование новых видов топлива на основе маловязких жидкостей); термическая или огневая очистка воды; пожаротушение.

Список литературы:

- Zubkov V.S., Cossali G.E., Tonini S., Rybdylova O., Crua C., Heikal M., Sazhin S.S. Mathematical modelling of heating and evaporation of a spheroidal droplet // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V.108. P. 2181-2190.
- Tonini S., Cossali G.E. An analytical model of liquid drop evaporation in gaseous environment // Int. J. Therm. Sci. 2012. V.57. P.45-53.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ 21-71-10008, <https://rscf.ru/project/21-71-10008/>)

УДК 536.24

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ КАК МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

Бобылев П.Г., Павлов А.В., Сапожников С.З.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Многие современные исследования теплообмена при кипении основаны на решении обратной задачи теплопроводности [1]. По температуре на поверхности образца, на котором происходит кипение, рассчитывают коэффициент теплоотдачи (КТО) и среднюю плотность теплового потока (ПТП). При этом использование термопар в эксперименте не дает достоверной картины. Более информативна градиентная теплометрия, совмещенная с термометрией. Метод основан на использовании гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГГДТП), реализующих поперечный эффект Зеебека. [2]. Он позволяет определить местную ПТП при кипении, а затем, и местный КТО:

$$\alpha = \frac{q}{(t_w - t_s)},$$

где t_w – температура поверхности модели, °С; t_s – температура насыщения воды, °С.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

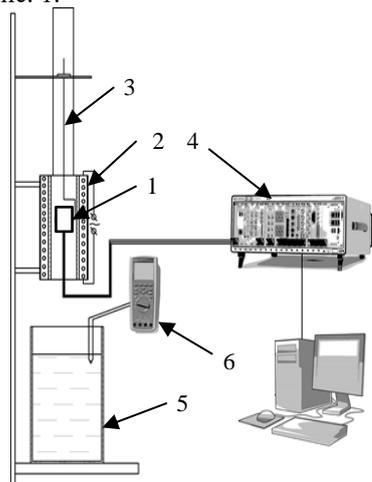


Рис. 1 – Схема экспериментального стенда:
1 – модель; 2 – печь; 3 – державка; 4 – ИВК NI;
5 – аквариум; 6 – мультиметр с термопарой

Экспериментальной моделью является цилиндр из титана ВТ22 диаметром 34 мм и высотой 22,3 мм. Модель 1 помещается в проходную печь 2 и фиксируется в ней державкой 3. Сигналы ГГДТП из композиции медь-никель и термопары (медь-алюмель) записываются на измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) 4 модели NI PXI-1050 с частотой записи 5000 изм/с. Датчик и термопара расположены в центре верхней образующей модели. При достижении необходимой температуры модели державка высвобождается, и образец погружается в аквариум 5 емкостью 10 л, в котором температура воды поддерживается омическим нагревателем и отслеживается мультиметром 6 с термопарой модели Fluke 289 [3].

Для определения КТО необходимо точно знать температуру жидкости вблизи модели. При пленочном режиме, температуру жидкости принимают равной температуре насыщения, т.к. паровая пленка, покрывает всю поверхность теплообмена. Совместив высокоскоростную визуализацию с градиентной теплометрией удалось определить границу пленочного режима [3].

Выполнены эксперименты при начальной температуре модели $t_w = 464$ °С и температуре воды $t_f = 64; 73$ и 80 °С. Рассчитан местный КТО при пленочном кипении, когда температура воды вблизи модели равна температуре насыщения при атмосферном давлении.

Получены значения местного КТО и ПТП при пленочном кипении (рис. 2) в зависимости от недогрева воды ($\Delta t = t_s - t_f$).

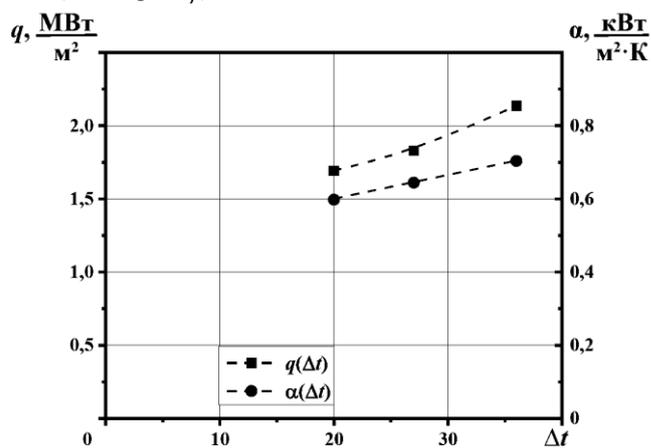


Рис. 2 – Зависимость местной КТО и ПТП при пленочном кипении от недогрева

Видно, что с увеличением недогрева линейно увеличивается не только местный ПТП, но и КТО. Данные результаты можно использовать для расчета КТО при интенсификации теплообмена при кипении.

Список литературы:

1. Experimental evaluation of constants for the Rohsenow poolboiling correlation / I.L. Pior // Int. J. Heat Mass Transfer 42 (1999)
2. Heatmetry The Science and Practice of Heat Flux Measurement / Sapozhnikov S.Z., Mityakov V. Yu., Mityakov A.V. // St.-Petersburg, Springer International Publishing, 2020. 209 p.
3. Исследование кипения на поверхности шара методом градиентной теплометрии / Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Гусаков А.А., Павлов А.В., Бобылев П.Г. // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. №10. С. 434–441.

*Работа выполнена при поддержке
гранта РНФ № 22-29-00160*

УДК 536.24: 536.423.1: 533.563

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ИСПАРЕНИИ/КИПЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯБрестер А.Е.^{1,2}, Жуков В.И.^{1,2}, Павленко А.Н.¹¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

В данной работе представлены экспериментальные данные по влиянию высоты горизонтального слоя жидкости на коэффициент теплоотдачи при испарении/кипении в условиях пониженного давления.

Эксперименты проводились на экспериментальной теплообменной вакуумной установке, рабочее тело которой представляет собой термосифон, подробное описание которой приведено в работе [1].

В качестве рабочей жидкости использовался н-додекан. В ходе экспериментов получали стационарные режимы теплообмена, при которых регистрировались температуры по толщине обогреваемой стенки, давление над слоем жидкости в рабочей камере. Давление в рабочей камере варьировалось в широком диапазоне значений от 33 Па до $2 \cdot 10^4$ Па. Опыты проводились при высотах слоя жидкости h (h/l_σ) от 1,4 мм (0,81) до 40,0 мм (23,22). Безразмерная высота (h/l_σ), определена при давлении 133 Па (при этом давлении температура насыщенных паров равна $52,07^\circ\text{C}$, а капиллярная постоянная $l_\sigma = 1,78$ мм).

На рисунке 1 приведена зависимость коэффициента теплоотдачи от высоты (в том числе в безразмерном виде) слоя жидкости при постоянном тепловом потоке $q = 2,5 \cdot 10^4$ Вт/м² для трех различных давлений. Коэффициенты теплоотдачи получены из экспериментальных данных зависимости $\alpha(q)$, при $q = 2,5 \cdot 10^4$ Вт/м².

При давлении 133 Па для высоты слоя жидкости 1,4 мм данный тепловой поток соответствовал критическому тепловому потоку. Максимальное значение коэффициента теплоотдачи достигалось при высоте слоя жидкости 1,7 мм ($h/l_\sigma=0,99$). Затем с ростом высоты слоя жидкости коэффициент теплоотдачи уменьшается, что вызвано увеличением термического сопротивления слоя жидкости, а для высот слоя 20 мм и 40 мм коэффициент теплоотдачи остается практически постоянным, поскольку основным механизмом переноса тепла является конвекция при турбулентном режиме. Данные полученные при давлениях 10^4 Па и $2 \cdot 10^4$ Па соответствуют пузырьковому режиму кипения. При увеличении высоты слоя жидкости коэффициент теплоотдачи возрастает и достигает максимального своего значения при высоте слоя 10 мм (см. рис.

1) при дальнейшем увеличении высоты слоя, коэффициент теплоотдачи практически не изменяется. Кипение при высотах слоя 20 мм и 40 мм соответствует режиму пузырькового кипения в большом объеме. Похожие результаты были получены для воды в работе [2], где различие в интенсивности теплоотдачи при различных высотах слоя жидкости объясняется разницей в движении и отрыве пузырьков пара от поверхности нагрева.

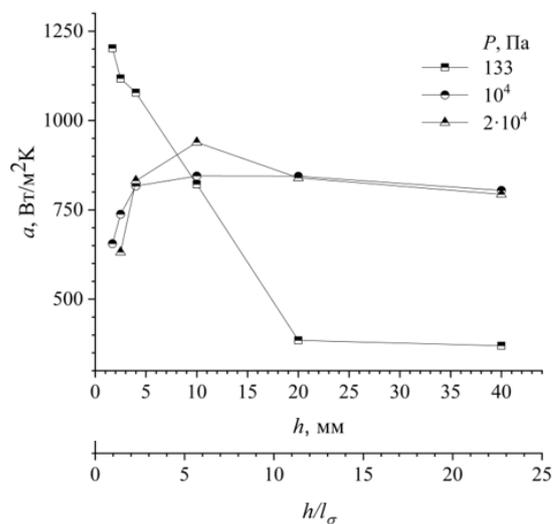


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от высоты слоя жидкости при $q = 2,5 \cdot 10^4$ Вт/м².

Список литературы:

1. Zhukov V.I. and Pavlenko A.N. Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2018. V. 117. P. 978-990.
2. Shukla M.Y. and Kandlikar S.G. Influence of liquid height on bubble coalescence, vapor venting, liquid return, and heat transfer in pool boiling // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 173. P. 121261.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800216-1)

УДК 536.423

ВЗРЫВНОЕ ВСКИПАНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ

Виноградов В.Е., Павлов П.А.

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Импульсный электролиз используется в технике как для интенсификации процессов осаждения гальванических покрытий, так и для получения газообразного водорода и кислорода [1]. В результате быстрого роста тока при импульсном электролизе на поверхности электродов создается повышенная концентрация ионов и газовых продуктов электролиза. Соответственно, следует ожидать, что вскипание раствора возможно как вследствие критического пересыщения газовыми продуктами распада электролита, так и так и действием кулоновских сил между ионами одинакового знака в двойном электрическом слое [2]. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию механизма вскипания слабого раствора электролита на платиновом электроде.

Опыты проводились с раствором гидроксида калия (KOH) в воде при мольной концентрации KOH до 3% при температуре 25°C. В результате электролиза раствора KOH в воде на аноде выделяется кислород, а на катоде кислород. В качестве активного электрода, на котором исследовался процесс вскипания электролита, служила платиновая проволоочка диаметром 20 или 30 мкм длиной 1 см. Второй электрод - пластина из нержавеющей стали шириной 6 мм и длиной 1 см. Пластина помещалась параллельно платиновой проволоочке на расстоянии 3-5 мм. Импульсное напряжение между электродами создавалось с помощью генератора одиночных прямоугольных импульсов амплитудой до 90В и длительностью от 15 до 50 мкс. Плотность тока на платиновом электроде достигала 10^7 А/м^2 .

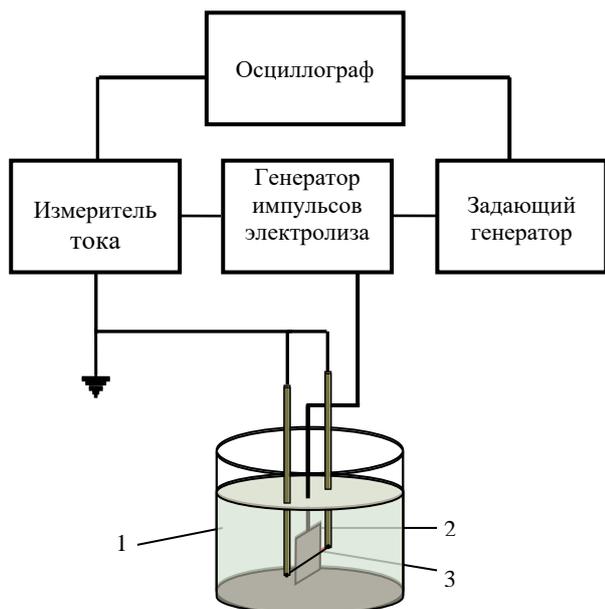


Рис.1. Измерительная ячейка: 1 – корпус ячейки; 2 – катод; 3 – анод.

В зависимости от полярности импульса платиновая проволоочка могла быть или анодом или катодом. В процессе опытов записывались осциллограммы тока электролиза. Вскипание (разрыв) раствора на электроде регистрировалось по резкому спаду тока при постоянном напряжении на электродах (рис.2).

По осциллограммам рассчитывались количество газа, растворившегося в жидкости на поверхности электрода.

В рамках закона Генри [3] сделана оценка равновесного давления газа по его концентрации на поверхности электрода в момент взрывного вскипания электролита. Показано, что в случае выделения кислорода на платиновом аноде, вскипание раствора происходит при концентрации газа, соответствующей расчетам по формулам теории гомогенной нуклеации [4]. При выделении водорода на платиновой проволоочке в качестве катода, рассчитанная из экспериментальных данных концентрация газа, при которой происходит взрывное вскипание электролита, значительно выше расчета по классической теории нуклеации. Обсуждаются возможные причины такого расхождения. Проведен анализ ситуаций, при которых возможен разрыв электролита в результате кулоновского взаимодействия в двойном электрическом слое.

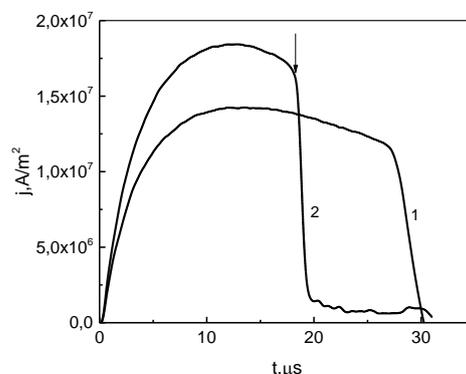


Рис. 2. Осциллограммы плотности тока на платиновом электроде: 1 - нет вскипания, 2 – вскипание на электроде. Длительность импульса тока 30 мкс. Стрелкой показан момент разрыва тока в результате вскипания электролита.

Список литературы:

1. Импульсный электролиз / Н.А. Костин, В.С. Кубановский, А.В. Заблудовский. Отв.ред.. А.В. Гордынский. Киев: Наукова думка. 1989. 168 с.
2. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. Изд.Мир. Москва. 1979. 568 с.
3. Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде: Справочное пособие. М.: Недра.1991. 167 с.
4. Метастабильная жидкость. / Скрипов В.П. М.: Наука. 1972. 312с.

УДК 621.4

РАСЧЕТ НАГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕЛА В ИНДУКТОРЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАЗРАБОТКЕ КОСМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ТИПА

Виноградов Д.А.¹, Глазков В.В.², Ковешников К.С.^{1,3}, Тепляков И.О.¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, Ижорская, 13 стр.2

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Россия, Москва, Красноказарменная, 14

³ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
115191, Россия, Москва, ул. Большая Тульская, 52

Проблемы, связанные с загрязнением орбиты Земли космическим мусором, беспокоят научное сообщество с 1957 г., когда в СССР был запущен первый в мире искусственный спутник. С того момента количество объектов на орбите Земли сильно выросло и на 2021 год составляло 21901, при этом это только доступные для наблюдения с Земли объекты. С уверенностью можно сказать, что это число с каждым годом будут увеличиваться. Поскольку перемещение в космосе требует затрат рабочего тела на создание реактивной тяги, в настоящее время, это рабочее тело (топливо) приходится на орбиту доставлять с Земли, что требует колоссальных затрат. Использование космического мусора же в качестве источника массы для создания тяги позволяет решить эту проблему. В нашей конструкции, основная часть ракетного двигателя — это индукционный испаритель металла. Схема конструкции приведена на рис.1. Фрагменты космического мусора помещаются в рабочую камеру, переменный ток высокой частоты в индукторе приводит к возникновению индуцированного тока в металлических фрагментах и их разогреву. Наличие вакуума обеспечивает интенсивное испарение и создание тяги (F). Для решения задачи об индуцированном нагреве металла в индукторе на первом этапе необходимо решить задачу о распределении индуцированного магнитного поля.

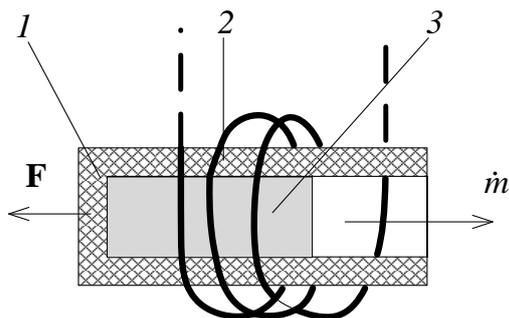


Рис. 1. Схема испарительного двигателя. 1 – рабочая камера, 2 – индуктор, 3 – металлические фрагменты космического мусора.

Двумерная постановка задачи выглядит следующим образом (см. рис.2). Тело заданной формы помещено в переменное неоднородное магнитное $\mathbf{B}_0(r, z)$ с после с частотой ω . Внешнее магнитное поле создается системой колец с током.

Распределение внешнего поля от проводников может быть рассчитано из закона Био-Савара-Лапласа [1]. Для нахождения индуцированного магнитного

поля используется подход описанный в [2], модифицированный для численного расчета.

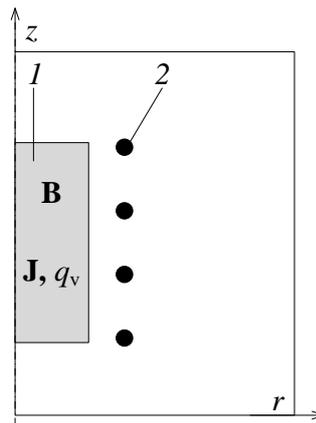


Рис.2 Схема расчетной области. 1 – нагреваемое тело, 2 – кольца, создающие магнитное поле.

На неструктурированной сетке, методом контрольного объема решается уравнение Гельмгольца для векторного потенциала магнитного поля:

$$\Delta \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = 0.$$

Здесь $k = \sqrt{-i\omega\sigma\mu_0}$, где i – мнимая единица, ω – циклическая частота, σ – проводимость среды, μ_0 – магнитная постоянная, тогда магнитное поле может быть найдено как:

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A},$$

а индуцированный ток как:

$$\mathbf{J} = -i\omega\sigma\mathbf{A}.$$

На следующем этапе решается тепловая задача о нагреве материала в индукторе с учетом фазового перехода и излучения. Решение позволяет оценить требуемую вводимую мощность и скорость испарения.

Результаты численного решения показывают удовлетворительное совпадения с аналитическими оценками и могут быть использованы при подготовке экспериментов.

Список литературы:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред. 2-е изд., испр. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. - 621 с. (т. VIII).
2. Nagel J. Induced Eddy Currents in Simple Conductive Geometries Due to a Time-Varying Magnetic Field // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2017. PP. 1-1. 10.1109/MAP.2017.2774206.

Работа поддержана грантом РФФ 23-29-00911

УДК 536.24

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕДНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С НЕОДНОРОДНОЙ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ

Владимиров В.Ю., Хмель С.Я., Чиннов Е.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Потребности микроэлектроники диктуют необходимость разработки более эффективных систем охлаждения, использующих, в частности, теплообмен при кипении. Одним из перспективных способов интенсификации теплообмена при кипении является использование поверхностей с неоднородной смачиваемостью или бифильных поверхностей [1, 2]. В этом случае на гидрофильной поверхности формируются локальные гидрофобные области, играющие роль эффективных центров парообразования, при этом хорошая смачиваемость на окружающей поверхности препятствует раннему развитию кризиса теплообмена, свойственному для однородных гидрофобных поверхностей. В данной работе проводится сравнение интенсивности теплообмена на модифицированных поверхностях с однородной смачиваемостью и на аналогичных поверхностях, но с дополнительно созданными локальными гидрофобными участками. Используются медные поверхности, изготовленные по двум технологиям: поверхности с массивом микрококонов из оксида кремния и текстурированные лазером поверхности с треугольными областями в виде «каверн» с последующей гидрофобизацией. Для создания бифильности в первом случае на поверхность локально осаждается фторполимер, во втором в процессе кипения гидрофобное покрытие легко разрушается между кавернами и относительно устойчиво в кавернах.

Поверхности первого типа создавались следующим образом: поверхность медного нагревателя покрывалась барьерным слоем вольфрама толщиной около 100 нм, формировались частицы оловянного катализатора. Нанопроволоки оксида кремния на частицах оловянного катализатора были синтезированы методом газоструйного электронно-лучевого плазмохимического осаждения из газовой фазы [3]. Микрококон представляет собой частицу оловянного катализатора субмикронного размера, покрытую со всех сторон нанопроволоками оксида кремния. Фторополимерная пленка на эти нагреватели напылялась методом HWCVD с использованием масок [4]. В результате на поверхности медного нагревателя формировались круглые гидрофобные пятна диаметром 50 мкм с шагом 200 мкм и диаметром 100 мкм с шагом 500 мкм с массивами микрококонов.

Текстурирование медных поверхностей осуществлялось методом лазерной абляции [5]. Далее осуществлялась гидрофобизация поверхности с помощью хемосорбции фторированного метоксисилана из паров при температуре 100-110°C. Ожидается, что гидрофобизованный слой на гладкой поверхности меди при кипении будет достаточно быстро разрушен, а в

областях, обработанных лазером, сохранится достаточно долго из-за разных типов адгезии. Таким образом, были сформированы бифильные поверхности с массивами каверн треугольной формы с эквивалентным диаметром примерно 100 мкм и шагом 780 мкм. После экспериментов на бифильных текстурированных поверхностях, эти поверхности подвергались плазменной обработке, после которой каверны теряли гидрофобные свойства и проводились эксперименты на таких, лишенных бифильности образцах.

Модифицированные поверхности создавались на головке (диаметром 5 мм) медного сердечника. В сердечнике возле рабочей поверхности располагаются две термопары на разной глубине для контроля температуры стенки и определения теплового потока. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная, деионизированная, дегазированная вода (Milli-Q). Давление атмосферное.

Эксперименты показали, что на каждой из бифильных поверхностей происходит интенсификация теплообмена при кипении по сравнению с гладкой однородной поверхностью. Сравнение интенсивности теплообмена на бифильных поверхностях и на модифицированных поверхностях, но с однородной смачиваемостью (без гидрофобной обработки) показало преимущество использования бифильных поверхностей в обоих случаях, то есть независимо от технологии изготовления. В свою очередь обычные модифицированные поверхности без гидрофобной обработки (массивы микрококонов оксида кремния и массивы каверн, полученных лазерным текстурированием) продемонстрировали крайне слабое отличие от гладкой меди. Вопрос об оптимальных характеристиках бифильных поверхностей на данный момент остается открытым и требует дальнейших исследований.

Список литературы:

1. Motezakker A.R. et al. Optimum ratio of hydrophobic to hydrophilic areas of biphilic surfaces in thermal fluid systems involving boiling // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Т. 135. С. 164-174.
2. Može M. et al. Pattern geometry optimization on superbiphilic aluminum surfaces for enhanced pool boiling heat transfer // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Т. 161. С. 120265.
3. Khmel S. et al. Experimental study of pool boiling on heaters with nanomodified surfaces under saturation // Heat Transfer Engineering. 2021. С. 1-19.
4. Safonov, A.I. et al. Deposition features and wettability behavior of fluoropolymer coatings from hexafluoropropylene oxide activated by NiCr wire // Thin Solid Films 2018. 653. 165–172.
5. Boinovich L B. et al. Pulsed laser induced triple layer copper oxide structure for durable polyfunctionality of superhydrophobic coatings // Advanced Materials Interfaces. 2018. V.5. №.21. С. 1801099.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания № 121031800213-0

УДК 53.09

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ В СОСТАВЕ АЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА

Волков Р.С., Керимбекова С.А., Стрижак П.А

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

Результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов испарения капель большое практическое значение, так как испарение капель различных жидкостей является основным процессом многих технологий [1]. Актуальна задача выбора исходных параметров аэрозоля для обеспечения оптимальных значений характеристик испарения [2]. Особенно важно оптимизировать эти процессы при высоких (более 500 К) температурах газовой среды [3], так как это позволит существенно сэкономить энергетические и временные ресурсы. При этом на интегральные характеристики испарения значительное влияние оказывает как дисперсность аэрозоля, так и объемная концентрация капель в потоке. Поэтому рациональным представляется экспериментальное определение зависимостей скоростей испарения жидкости в высокотемпературной среде от концентрации капель и их размеров.

На рис. 1 представлены установленные зависимости скоростей испарения воды от концентрации и начального размера капель. Руководствуясь результатами экспериментов (рис. 1), получена зависимость для прогнозирования скорости испарения капель в составе аэрозольного облака с концентрацией 0,03–0,1 л/м³ при известном начальном размере капель:

$$W_e = a + b \cdot R_d + c \cdot R_d^2, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

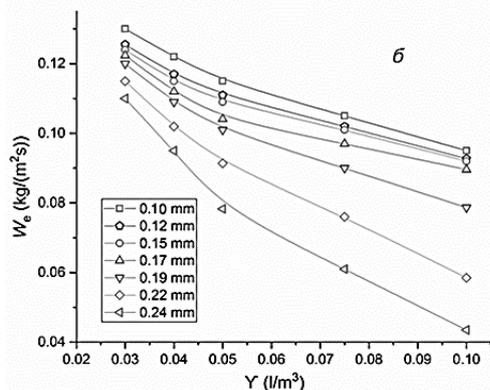
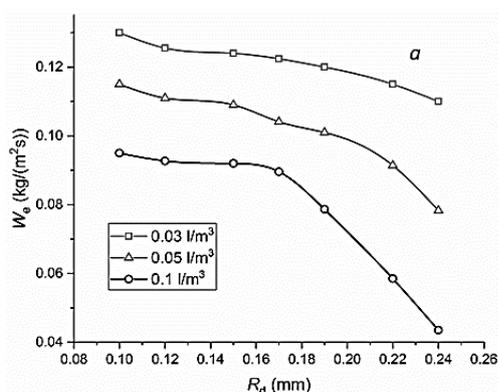


Рис. 1. Значения скоростей испарения капель воды с учетом их разных начальных размеров и концентраций.

Эксперименты показали (рис. 1б), что для капель размерами 0,1–0,17 мм увеличение их концентрации в потоке от 0,03 до 0,1 л/м³ приводит к уменьшению значений скорости испарения в диапазоне 24–28%. Для капель диаметром менее 0,15 мм уменьшение скорости испарения более значительно и составило 33–62%. Скорее всего, такой результат обусловлен усиливающимся влиянием свойств воды. В частности, определяющую роль играют высокая теплоемкость жидкости и теплота парообразования. Чем больше размеры капли, тем выше значение энергии, которую необходимо подвести к ее поверхности для интенсификации прогрева и фазовых превращений. Также важную роль играет фактор полидисперсности потока капель. Крупные капли при испарении создают буферную паровую зону для мелких капель, что снижает скорости прогрева и испарения последних.

В ходе обработки результатов экспериментов (рис. 1б) получена группа аппроксимационных выражений (в виде экспоненциальной функции):

$$W_e = \exp(a + b \cdot \gamma + c \cdot \gamma^2), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Также по результатам исследования предложен подход к определению скорости испарения капель аэрозоля ($R_d = 0,1–0,25$ мм), предполагающий ее прогнозирование с учетом известных значений скорости испарения одиночной капли. Аппроксимация результатов настоящей работы показала, что при $\gamma = 0$ и $R_d = 0,1–0,25$ мм (для $T_e = 750$ К) значения скоростей испарения совпадают и изменяются, в среднем, в диапазоне 0,15–0,17 кг/(м²·с). На основании данного заключения получена формула для оценки скорости испарения капель аэрозоля на основе коэффициента k :

$$W_e = k \cdot \left(\frac{R_d^*}{R_d}\right)^2 \cdot W_e^*, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$k = (-0,00496 + 1,66589 \cdot \exp(-24,058 \cdot \gamma)) \cdot \left(\frac{R_d^*}{R_d}\right)^{1,65795 + 7,58382 \cdot \gamma},$$

где R_d, R_d^* – радиус капли аэрозоля и одиночной капли, мм; W_e, W_e^* – массовая скорость испарения капли аэрозоля и одиночной капли, кг/(м²·с).

Список литературы:

1. Е. М. Bochkareva, М. К. Ley, V. V. Terekhov, V. I. Terekhov, J. Methodological Characteristics of an Experimental Investigation of the Process of Evaporation of Suspended Liquid Droplets // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. Т.92. №5. С.1171–1179.
2. P.V. Akulich. Simulation of Heat and Mass Transfer of Droplets in Drying an Overheated Liquid Under Conditions of Combined Energy Effect // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019. Т.92. №2. С.389–397.
3. В.А. Архипов, С.А. Басалаев, Н.Н. Золоторёв, К.Г. Перфильева, А.С. Усанина. Испарение кластера капель при движении в высокотемпературной газовой среде // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46 № 8. С. 25–28.

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В МИНИКАНАЛАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ ЖИДКОСТИ

Вяземская И.И.

РСК-Лабс,

121205, г. Москва, тер. Сколково инновационного центра, ул. Луговая, д. 4, к. 5, помещ. 19

Темпы развития современной микроэлектронной промышленности диктуют новые, ужесточающие требования к системам охлаждения. Мощность теплового потока, которую необходимо отводить от самых производительных чипов стремится к 1 кВт/см^2 и выше. Классические однофазные водяные макроканальные системы уже не справляются с такими задачами в разумных пределах расходов и температур. Применение миниканальных радиаторов и двухфазной системы охлаждения увеличивает эффективность теплообмена без значительного увеличения перепадов давления и расхода по сравнению с классическими системами.

В данной работе проведено исследование процесса кипения в миниканальном медном радиаторе, с каналами высотой 3 мм и шириной 0,2 мм. Нагревательным элементом являлся массивный медный тепловой клин с установленным патронным нагревателем. Зазор между радиатором и нагревателем заполнен термоинтерфейсом с теплопроводностью 12 Вт/мК . В качестве рабочих жидкостей использовались фторкетоны (Novac 7100 и Noah 5112 (аналог Novac 649)). Температура охлаждающей жидкости является одним из ключевых параметров с точки зрения стоимости создания и эксплуатации системы охлаждения. Исследования проводились в широком диапазоне температур рабочей жидкости от холодной (20°C) до близкой к температуре сатурации. Также, в реальных замкнутых системах охлаждения обычно поддерживается избыточное давление в любой точке системы. В литературе данные по влиянию давления жидкости на процессы кипения составляют небольшую часть по сравнению с исследованиями при атмосферном давлении. В работе проведены исследования при различных давлениях жидкости в радиаторе

Испытательный стенд представляет собой замкнутый контур с диэлектрической жидкостью. Миниканальный радиатор (1) соединен с нагревателем (2). Между ними установлена термопара (τ), показывающая наружную температуру стенки радиатора. Жидкость подаётся регулируемым насосом 3, проходит через фильтрующий элемент (6) и кориолисовый расходомер (в) после чего попадает в радиатор (1). На входе и выходе производятся замеры давления и температуры жидкости датчиками (а, б, г). Для визуального контроля на выходе из радиатора (1) присутствует участок прозрачной трубки (9) и ведется видеосъемка высоко скоростной камерой. После этого подогретая жидкость охлаждается в жидкостно-жидкостном теплообменнике. С помощью расширительного бака (5) регулятора давления (8) и компрессора (7) происходит регулировка давления в радиаторе.

Для стенда разработана САУ и система мониторинга в режиме онлайн, позволяющая видеть все интересные параметры на графиках в зависимости от времени. Все данные со всей системы управления и подключённых датчиков, а также управляющие сигналы записываются в едином логе, что значительно упрощает обработку экспериментальных данных.

В результате проведенных экспериментов сняты кривые кипения при различных параметрах: варьировались температура и расход охлаждающей жидкости, давление в радиаторе и мощность нагревателя). Во время экспериментов осуществлялась скоростная видеосъемка течения многофазной жидкости в выходном патрубке радиатора. С увеличением теплового потока, отмечалось появление микропузырей, с их дальнейшим увеличением в размере и переходом в кольцевой режим с паровым ядром и кольцевой пристеночной пленкой.

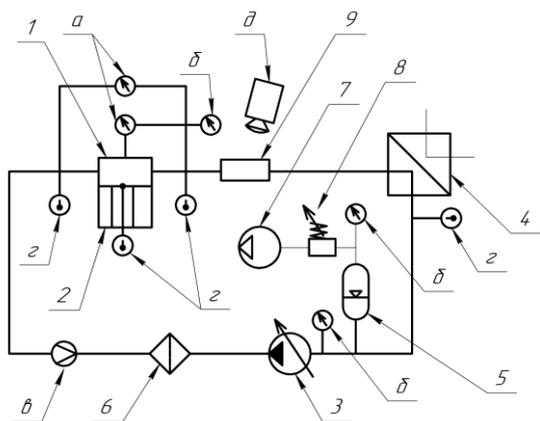


Рис. 1. Схема испытательного стенда.

УДК 536.248

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ЧЕТЫРЕХ ДИМЕТИЛОВЫХ ЭФИРОВ ЭТИЛЕНГЛИКОЛЕЙ

Галкин Д.А., Богатищева Н.С.

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Изменение климата, причину которого связывают с выбросами парниковых газов, является глобальной проблемой современности. В связи с этим актуальным становится развитие технологий улавливания и захоронения углерода (carbon capture and storage technology — CCS), которые позволяют снизить объем выбросов CO₂ в энергетике, металлургии, при производстве цемента и т.д. Выбор абсорбента с оптимальными физическими свойствами имеет большое значение для разработки эффективной технологии поглощения углекислого газа. В последнее время все большее применение находят смешанные абсорбенты, имеющие в своем составе, кроме химического компонента (этанолamina), компоненты физического действия, которые извлекают CO₂ за счет растворимости. Выбранные в качестве объектов исследования диметилловые эфиры этиленгликолей (глимы) являются физическими абсорбентами углекислого газа и могут быть использованы в составе перспективных гибридных поглотителей. Информация по теплофизическим свойствам глимов, представленная в литературе, не является исчерпывающей: теплопроводность ранее была измерена Бургдорфом и др. [1] при атмосферном давлении в узком температурном диапазоне (при температуре 298,15 и 323,15 К), температуропроводность глимов, вероятно, никогда не исследовалась.

В докладе будут представлены результаты измерения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности четырех глимов: диметилловых эфиров этиленгликоля, диэтиленгликоля, триэтиленгликоля и тетраэтиленгликоля. В эксперименте использовались образцы веществ с чистотой не менее 99 мол. %.

Коэффициенты температуропроводности были измерены методом лазерной вспышки с помощью установки LFA-457 MicroFlash Netzsch. Для работы с жидкими соединениями в эксперименте использовались два контейнера с разной толщиной слоя исследуемого вещества: 0,40 мм и 0,48 мм. Погрешность измерения температуропроводности жидкостей составляет 5 %.

Для измерения теплопроводности использовалась установка [2, 3], реализующая THW-метод. Для реализации данного метода необходимо было создать постоянный тепловой поток в исследуемый образец. Это получилось достигнуть путем поддержания постоянной мощности на нагревателе-зонде в ходе измерения

исследуемого образца. Измерения проводились следующим образом: на платиновый нагреватель-зонд длиной 5 см подается импульс длительностью 1,5 секунды, за это время исследуемый образец нагревается на 3 градуса, после чего полученные результаты обрабатываются для получения значения коэффициента теплопроводности. Данный температурный напор был выбран для уменьшения влияния конвекции.

Измерения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности выполнены для каждого вещества при атмосферном давлении в широком интервале температур его жидкого состояния. Получены уравнения, описывающие зависимость теплопроводности и температуропроводности от температуры, которые вместе с литературными данными по плотности [4] использовались для оценки изобарной теплоемкости глимов.

Полученные в настоящей работе экспериментальные данные сравнивались с результатами расчетов теплопроводности с помощью современных аддитивно-групповых методов [5].

Список литературы:

1. Burgdorf R., Zocholl A., Arlt W., Knapp H. Thermophysical properties of binary liquid mixtures of polyether and n-alkane at 298.15 and 323.15 K: Heat of mixing, heat capacity, viscosity, density and thermal conductivity // Fluid Phase Equilib. 1999. V. 164. P. 225-255
2. Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V. Returning to classic conditions of THW-technique: A device for the constant heating power mode // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 115. P. 769-773.
3. Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V. Comments on “Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids” (Appl. Therm. Eng. 105 (2016) 142) // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 129, P. 145 – 147.
4. Conesa A., Shen S., Coronas A. Liquid Densities, Kinematic Viscosities, and Heat Capacities of Some Ethylene Glycol Dimethyl Ethers at Temperatures from 283.15 to 423.15 K // Int. J. Thermophys. 1998. 19. 1343-1358.
5. Govender O., Rarey J., Ramjugernath D. Estimation of Pure Component Properties, Part 5: Estimation of the Thermal Conductivity of Nonelectrolyte Organic Liquids via Group Contributions // J. Chem. Eng. Data. 2020. V. 65. P. 1300-1312.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-29-00723,
<https://rscf.ru/project/23-29-00723/>*

УДК 536.248

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАСТВОРА ГЛИЦЕРИН-ГВЯЯКОЛ

Галкин Д.А., Скрипов П.В.

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Измерение коэффициента теплопроводности, а если точнее, расчет величины коэффициента теплопроводности из первичных данных опытов, является востребованным в рамках комплексного изучения процессов переноса. Поскольку объектами в наших опытах служат сложные жидкие среды, в качестве наиболее подходящего метода был выбран метод нестационарного нагрева тонкого проволочного зонда (Transient Hot Wire Method в англоязычной литературе, коротко – THW).

Выполнены измерения коэффициента теплопроводности водного раствора глицерин – гвоякол. Выбранная в качестве объекта исследования система характеризуется наличием как нижней, так и верхней критической температуры растворения, то есть, имеет на фазовой диаграмме раствора замкнутую область несовместимости компонентов.

Для измерения коэффициента теплопроводности использовалась установка [1, 2], реализующая метод нестационарного нагрева проволочного зонда. Одним из основных условий данного метода является поддержание постоянной плотности теплового потока. Данное требование эквивалентно поддержанию постоянства мощности на нагревателе–зонде в ходе импульса нагрева. Будучи ключевым требованием в схеме аналитического решения задачи THW-теплообмена, оно, тем не менее, пренебрегается большинством исследователей, см. обсуждение в [1, 2].

В ходе эксперимента на платиновый нагреватель–зонд длиной 5 см подается импульс постоянной электрической мощности длительностью 2 секунды. За это время исследуемый образец нагревается приблизительно на 3 градуса. Данный температурный напор был выбран как компромисс между повышением чувствительности устройства и необходимостью избежать «включения» конвекции.

Измерения коэффициента теплопроводности системы глицерин-гвоякол выполнены при атмосферном давлении в диапазоне значений температуры от комнатной до температуры фазового разделения по механизму жидкость-жидкость (нижней ветви бинодали) и выше температуры фазового разделения жидкость-жидкость (верхней ветви бинодали) в полном диапазоне концентраций. Полученные результаты измерения для чистых компонентов раствора были сопоставлены с имеющимися литературными данными.

Достижение температуры фазового разделения в ходе повышения температуры в измерительной ячейке определялось по отклонению температурной зависимости коэффициента теплопроводности от ее плавной экстраполяции. Таким образом, была сделана оценка положения нижней ветви бинодали жидкость-жидкость системы на диаграмме температура / концентрация по данным о нестационарном теплообмене. На следующем шаге исследования авторы планируют выяснить степень общности такого результата для систем с нижней критической температурой растворения и проверить гипотезу о появлении дополнительного теплового сопротивления раствора при нарушении однородности системы [3].

Список литературы:

1. Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V. Returning to classic conditions of THW-technique: A device for the constant heating power mode // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V.115, P. 769-773.
2. Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V. Comments on “Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids” (Appl. Therm. Eng.105 (2016) 142) // Applied Thermal Engineering. 2018. V.129, P.145 – 147.
3. Volosnikov, D.V.; Povolotskiy, I.I.; Skripov, P.V. Heat conduction of superheated mixtures: relationship with excess volume // J. Eng. Thermophys. 2022. T.31 №1, С. 19-31.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 19-19-00115-П,
<https://rscf.ru/project/19-19-00115/>*

УДК 536

ПРОФИЛИ ТЕМПЕРАТУР ВБЛИЗИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ ВОДА-ВОДЯНОЙ ПАР

Гатапова Е.Я.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Большой интерес для инженеров и исследователей представляет возможность использования сверхинтенсивного испарения тонких пленок жидкости в системах охлаждения нового поколения. Одной из до конца нерешенных фундаментальных задач в данной области является понимание механизмов тепло- и массообмена на границе раздела жидкость-пар в ограниченных областях, которые не могут быть описаны в континуальном приближении, так как влияние эффектов, происходящих в слое Кнудсена на общий теплообмен, может быть значительным [1-3]. Особенностью исследований, представленных в данной работе, является то, что измерения проведены для случая испарения жидкости в собственный пар внутри климатической камеры в условиях пониженного давления. Данные получены на микроуровне, а именно, температура определена с разрешением 3 мкм и точностью 0,03К. Такие данные в литературе практически отсутствуют.



Рис. 1. Фотография экспериментальной установки.

Измерения проводились в климатической камере при пониженном давлении для системы вода-водяной пар (рис. 1). Была изготовлена термостатируемая вакуумная камера из нержавеющей стали. Осесимметричный рабочий участок был сделан аналогично предыдущей нашей кювете [1] из фторопласта. Диаметр кюветы 35 мм, глубина 1 мм. Диаметр нагревателя 1,5 мм, нагреватель расположен посередине на нижней стенке. Специально изготовленная микротермопара К-типа с поперечным размером королька 3 мкм и другие стандартные термопары были заведены внутрь климатической камеры. Были проведены эксперименты для системы вода-водяной пар для температур паровой фазы 3, 6, 10, 22, 30°C.

На рис. 2 представлены профили температур для системы вода-водяной пар при температуре водяного пара $T_v=30,5$ °C и давлении в системе $p_v=p_{sat}(T_v)=4262$ Па. В начальном состоянии система находится в абсо-

лютном равновесии, наблюдается постоянная одинаковая температура в жидкости и в паре. Это конечно давно известно из теории, но экспериментальных измерений с такой точностью не было до сих пор. Далее при включении нагревателя, даже при малой мощности, меняется картина – появляется неравновесность, проявляющаяся скачком температуры на межфазной границе. И скачок этот растет с увеличением мощности. Регистрировались моды с положительным скачком температур, а также отсутствие скачка в условиях равновесия. Отрицательный скачок температуры фиксировался лишь для условий, когда существовал градиент температуры в паре. Результаты согласуются количественно с результатами, полученными на основе уравнений Больцмана. Наши новые данные идеально подходят для сравнения с расчетами по кинетическим уравнениям так как описывают практически одномерное течение. Результаты представляют собой важные данные для понимания теории фазовых переходов и впервые подтверждают многие классические подходы.

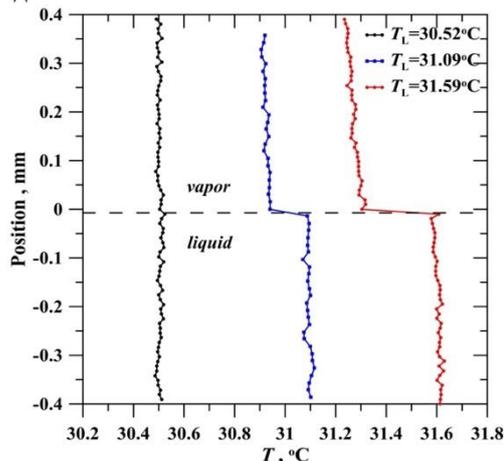


Рис. 2. Измеренные профили и скачки температур вблизи межфазной границы вода-водяной пар при $T_v=30,5$ °C и $p_v=p_{sat}(T_v)=4262$ Па.

Список литературы:

- Gatapova E.Y., Graur I.A., Kabov O.A., Aniskin V.M., Filipenko M.A., Sharipov F., Tadrist L. The temperature jump at water-air interface during evaporation // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 104. P. 800 - 812.
- Labuntsov D.A. and Kryukov A.P. Analysis of intensive evaporation and condensation // Int. J. Heat Mass Transfer. 1979. Vol. 22. P. 989-1002.
- Graur I.A., Gatapova E.Ya., Moritz W., Batueva M.A. Non-equilibrium evaporation: 1D benchmark problem for single gas // Int. J. Heat Mass Transfer. 2021. Vol. 181. 121997.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 20-19-00722,
<https://rscf.ru/project/20-19-00722/>

УДК 536.246

ВЛИЯНИЕ ТЕМПА НАРАСТАНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА КРИВУЮ КИПЕНИЯ

Делов М.И., Кузьменков Д.М., Куценко К.В., Лаврухин А.А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31

Работа теплового энергетического оборудования при номинальных условиях эксплуатации характеризуется постоянством условий теплоотдачи. В случае нарушения нормальных условий эксплуатации в таких устройствах возникают переходные и нестационарные режимы теплообмена, которые могут сопровождаться изменением теплового потока с теплоотдающей поверхностью. Как правило, при анализе таких процессов используется квазистационарное приближение, в рамках которого коэффициент теплоотдачи принимается равным стационарному значению при заданном тепловом потоке [1, 2]. Однако, применение данного предположения нуждается в обосновании, так как динамическая кривая кипения, полученная при увеличении мощности тепловыделения, может существенно отличаться от квазистационарной кривой.

В настоящей работе представлено экспериментальное исследование влияния темпа нарастания тепловой нагрузки на кривую кипения жидкого азота. Эксперименты проводились на установке, описание которой содержится в работе [3]. В качестве рабочего участка использовалась платиновая проволока диаметром 0,1 мм, которая одновременно служила нагревателем и термодатчиком сопротивления. Проволока располагалась горизонтально в большом объеме насыщенного жидкого азота при давлениях от 1 до 4,5 атм. и нагревалась за счёт пропуска по ней электрического тока, который в экспериментах изменялся примерно линейно с различными темпами роста. Отводимый тепловой поток рассчитывался по уравнению теплового баланса в предположении малого числа Био нагревателя.

На квазистационарной кривой кипения можно выделить три характерных области: однофазной конвекции, пузырькового и плёночного режимов кипения. При достижении перегрева закипания на теплоотдающей поверхности образуются паровые пузыри и перегрев рабочего участка снижается. На рис. 1 схематично показан, механизм перехода от конвекции к пузырьковому кипению при различных темпах нарастания тепловой нагрузки. Как было показано в работе [4], закипание азота характеризуется быстрым увеличением количества центров парообразования (переход ВС на рис. 1). При этом вне зависимости от перегрева закипания (точки В и Е) количество образовавшихся центров (точки С и F) для заданного нагревателя остаётся примерно одинаковым, при котором происходит закипание в условиях квазистационарного подвода тепла (точка С). При дальнейшем увеличении теплового потока перегрев поверхности нагревателя меняется соответственно по линиям CD и FG. При достижении значения первого критического теплового потока происходит кризис пузырькового кипения (точки

G и D на рис. 1). После наступления кризиса происходит режим плёночного кипения, который отличается от пузырькового значительно более низким коэффициентом теплоотдачи.

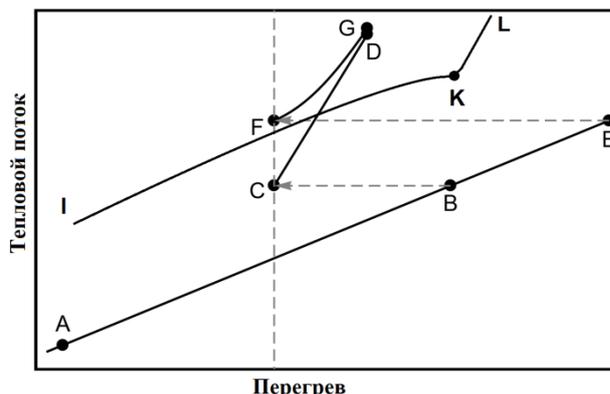


Рис. 1 Механизм перехода от конвекции к пузырьковому кипению при различных темпах нарастания тепловой нагрузки.

Как показали эксперименты, начиная с некоторого темпа увеличения тепловой нагрузки характер динамических кривых кипения меняется (IKL на рис. 1). Основное отличие от квазистационарной кривой кипения заключается в отсутствии стадии пузырькового кипения (линия IK). Кризис теплообмена (точка К) происходит при значении теплового потока, соответствующего нестационарному критическому тепловому потоку. Значение минимального нестационарного критического теплового потока и средний темп нарастания теплового потока соответствуют экспериментальным данным и расчёту по модели, представленным в работе [3].

Список литературы:

1. Poniewski M.E., Thome J.R. Nucleate boiling on micro-structured surfaces. Heat Transfer Research, Inc., USA, 2008, 366 p.
2. Levin A., Khan P. Characteristics of nucleate boiling under conditions of pulsed heat release at the heater surface. Applied Thermal Engineering, 2019, vol. 149, pp. 1215-1222.
3. Delov M.I., Kuzmenkov D.M., Lavrukhin A.A., Kutsenko K.V. Transient boiling crisis in liquid nitrogen. Influence of heater size and heating rate. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, vol. 157, 119941.
4. Balakin B.V., Delov M.I., Kosinska A., Kutsenko K.V., Lavrukhin A.A. Heat transfer during transition to nucleate boiling. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, vol. 91, pp. 1101-1105.

Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда № 22-29-01009,
<https://rscf.ru/project/22-29-01009/>

УДК 536.242

ОХЛАЖДЕНИЕ СПРЕЕМ ПОВЕРХНОСТИ, ВОСПРИНИМАЮЩЕЙ ВЫСОКИЕ ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ

Демидов А.С., Захаренков А.В., Комов А.Т., Дедов А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

Известно, что охлаждение, связанное с фазовым переходом, такое как кипение и испарение, способно наиболее эффективно отводить высокие тепловые потоки. В то же время, охлаждение тел при фазовых переходах широко изучается уже в течение десятилетий.

Среди нескольких методов охлаждения, связанных с фазовым переходом, охлаждение распылением обеспечивает высокую эффективность отвода тепла при равномерном охлаждении и отсутствии перегревов. В этом методе распыленные капли жидкости, попадая на горячую поверхность, охлаждают ее за счет сочетания скрытой и явной теплоты.

Многочисленные способы применения спрея можно найти в сталелитейной промышленности, атомной энергетике, противопожарной защите. Кроме того, проводились исследования с целью определения возможности использования охлаждения спреем в таких областях, как электроника [1-2], лазерные технологии [3], аэрокосмическая инженерия [4].

Для исследования охлаждения нормально расположенного потока спрея по отношению к горизонтально ориентированному рабочему участку, подверженному воздействию высоких тепловых потоков на базе кафедры ОФиЯС был сконструирован и смонтирован экспериментальный исследовательский модуль охлаждения (см. рис. 1).

Рабочий участок, воспринимающий тепловую нагрузку, изготовлен из меди марки М0. Толщина рабочего участка составляет 15 мм. При такой конфигурации рабочего участка возможно добиться получения плотности теплового потока более 10 МВт/м^2 без разрушения рабочего участка.

Нагрев рабочего участка осуществляется при помощи сканирующего электронного пучка, источником которого является электронно-лучевая пушка ТЕТА 60Н60 с максимальным ускоряющим напряжением 60 кВ и током пучка до 1000 мА. Поставляемое в комплекте с электронно-лучевой пушкой программное обеспечение позволяет изменять площадь нагреваемой поверхности, вплоть до полного покрытия верхней поверхности рабочего участка сканирующим электронным пучком.

Охлаждение осуществляется при помощи мелкодисперсного спрея, источником которого является пневматическая форсунка. Для формирования спрея используется дистиллированная вода и воздух. Минимальный диаметр капли на выходе из форсунки составляет 50 мкм.

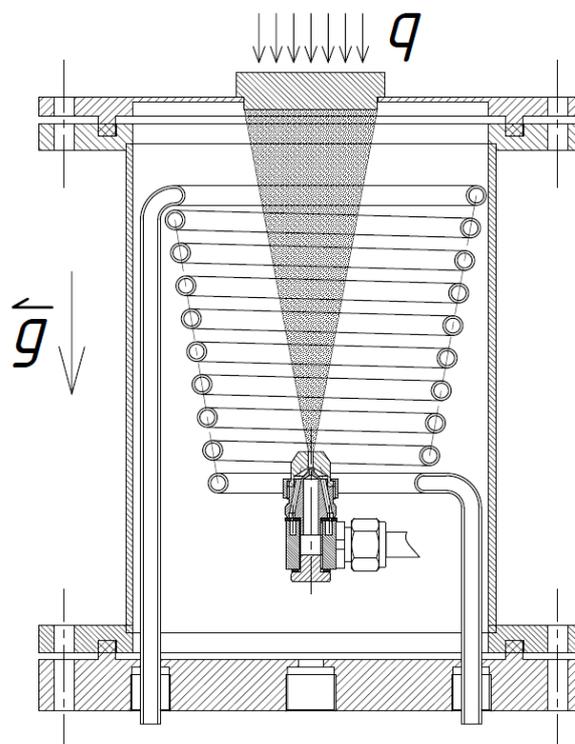


Рис. 1. Схема модуля охлаждения.

В ходе первичной обработки экспериментальных данных величина отводимого теплового потока составляла около 10 МВт/м^2 при расходе воды и воздуха больше 21 г/с и 3 г/с соответственно.

Предварительный анализ результатов показывает, что использование предложенного способа может стать хорошей альтернативой традиционным методам охлаждения высокотемпературных поверхностей в различных отраслях промышленности.

Список литературы:

1. A comparative study of cooling of high-power density electronics using sprays and microjets / M. Fabbri, S. Jiang and V.K. Dhir, J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 127, pp. 38-48, 2005.
2. A Comprehensive Review on the Core Thermal Management Improvement Concepts in Power Electronics / S. Lohrasbi, R. Hammer, W. Essl et. al., IEEE, Vol. 8, pp. 166880-166906, 2020.
3. Review of Issues and Solutions in High-Power Semiconductor Laser Packaging Technology / Y. Yan, Y. Zheng, H. Sun et. al., Front. Phys., Vol. 9, p. 669591, 2021.
4. Spray cooling heat transfer: technology overview and assessment of future challenges for micro-gravity application / E.A. Silk, E.L. Golliher and R.P. Selvam, Energy Convers. Manag., Vol. 49, pp. 453-468, 2008.

Работа выполнена при поддержке
гранта РНФ № 21-79-10179

УДК 536.2

ТЕПЛОТДАЧА В КРУГЛОМ КАНАЛЕ ПРИ ЦИРКУЛЯЦИИ НЕАЗЕОТРОПНОЙ СМЕСИ

Жуков В.Е., Мезенцева Н.Н., Мезенцев И.В., Сухорукова Е.Ю.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Использование смесей в качестве хладагентов и теплоносителей в различных энергетических системах получило широкое распространение [1-3]. Теплофизические свойства смеси отличаются от свойств отдельных компонентов. Следует отметить, что процесс парообразования в однокомпонентных жидкостях и неазеотропных смесях протекает по-разному. Коэффициенты летучести для компонентов неазеотропной смеси существенно различаются. При пузырьковом кипении неазеотропной смеси происходит интенсивное выделение легкокипящего компонента, что приводит к изменению его концентрации как в жидкой, так и в паровой фазах. Это приводит к изменению локального парциального давления и увеличению температурного градиента между стенкой и температурой насыщения смеси. Кроме того, одной из особенностей кипения неазеотропной смеси являются диффузионные процессы, обусловленные градиентом концентраций в перегретом слое жидкости у стенки и вблизи границы раздела жидкость-пар. Оба фактора ведут к существенному снижению интенсивности теплоотдачи при кипении [4]. В данной работе приведены результаты исследования интенсивности теплоотдачи неазеотропной спирто-водяной смеси при вынужденной циркуляции в круглом обогреваемом канале.

Исследования проводились в канале из нержавеющей стали. Внутренний диаметр канала 7.6 мм, толщина стенки – 0.2 мм. Обогрев канала осуществлялся прямым тепловыделением в стенке за счет протекания электрического тока. Длина канала – 4 м. По длине канала на внешней стороне стенки установлены 13 тонкопленочных платиновых термометров сопротивления NEL-700, измеряющих температуру стенки. Из них 3 термометра были установлены на верхней образующей канала, а остальные 10 на нижней образующей. Для измерения перепада температуры потока по длине канала были установлены термометры перед входом в обогреваемую часть канала и за обогреваемой частью канала. В начале и конце канала установлены датчики давления. Также давление измерялось в накопительном сосуде, из которого подавалась жидкость в рабочий участок и, в который возвращался одно- либо двухфазный поток после прохождения канала рабочего участка. В этом же сосуде установлен теплообменник для эвакуации из замкнутой системы тепла, подаваемого на рабочий участок. Циркуляция теплоносителя через теплообменник осуществлялась криотермостатом. Циркуляция исследуемой смеси осуществлялась погружным центробежным насосом, расположенным непосредственно в накопительном сосуде. На входе в рабочий участок установлен турбинный расходомер. За рабочим участком установлен стеклянный оптический участок, позволяющий регистрировать появление двухфазного потока.

Исследования проводились на смеси с массовыми концентрациями этанола 20 и 22%, соответственно. Абсолютное давление в сосуде поддерживалось в одной серии экспериментов в пределах $0,02 \pm 0,001$ МПа, в другой – $0,05 \pm 0,001$ МПа. Диапазон массовых расходов жидкости через канал 44 – 720 кг/м²с, плотность теплового потока – 1200 – 12000 Вт/м². При определении температурного напора в локальных точках по длине канала локальная температура жидкости определялась из теплового баланса. Для определения локальной температуры насыщения смеси было принято линейное распределение давления по длине рабочего участка и неизменная концентрация легколетучего компонента. На Рис. 1 показано распределение температуры стенки по длине канала при различных тепловых нагрузках и близких массовых расходах смеси.

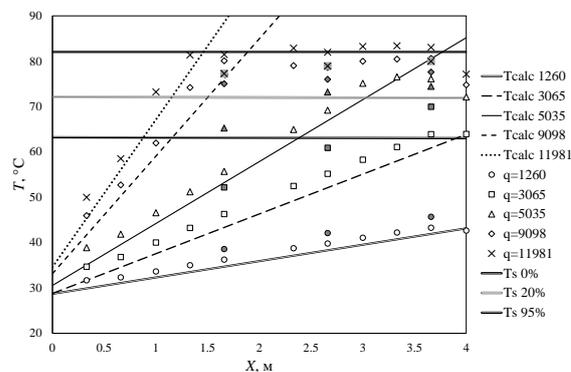


Рис. 1. Распределение температуры стенки по длине канала при различной тепловой нагрузке. Концентрация смеси – 20%, массовый расход – 44 кг/м²с.

Для данного массового расхода, при изменении тепловой нагрузки, реализованы различные режимы теплообмена в канале – от теплообмена к однофазному потоку до практически полного осушения канала. Интенсивное испарение легколетучего компонента приводит к значительному обеднению смеси на выходе канала.

Список литературы:

1. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе. / Бабакин Б.С., Стефанчук В.И., Ковтунов Е.Е. М.: Колос. 2000. 160 с.
2. Цветков О.Б. Современные хладагенты, хладоносители и проблемы экологии // Холодильная техника. 2008. №1. С. 30-34.
3. Бараненко А.В., Кириллов В.В., Сивачев. О выборе хладоносителя для систем косвенного охлаждения // Вестник Международной академии холода. 2010. № 2. С. 22-24.
4. Гогонин, И.И. Теплообмен при кипении бинарных смесей в условиях свободной конвекции // Инженерно-физический журнал. 2013. Т.86, №3. С. 646-651.

Исследование выполнено в рамках ГЗ ИТ СО РАН
по теме №121031800216-1

УДК 536.24

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ

Зайнуллина Э.Р., Митяков В.Ю.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

Мониторинг теплообмена при плёночной конденсации насыщенного водяного пара с помощью градиентной теплотометрии, представляет научный и практический интерес. Постоянная времени градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) не превышает 10^{-8} с [1], что позволяет в режиме реального времени и без визуализации оценить плотность теплового потока (ПТП) и местные коэффициенты теплоотдачи при конденсации. В эксперименте совмещено прямое измерение местной ПТП с помощью градиентной теплотометрии; расчёт местной ПТП по термическому сопротивлению стенки трубы на основе термометрии; расчёт местной и средней ПТП по модели Нуссельта и уравнению теплового баланса, соответственно.

В предыдущих опытах [2, 3] выявлена существенная нестационарность теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на вертикальной трубе. Для анализа пульсаций ПТП на временных теплограммах предусмотрено визуальное наблюдение конденсации с помощью экшн-камеры DJI Action 2 с частотой записи 120 Гц.

Экспериментальный участок собран по схеме «труба в трубе» (рис. 1, а). Внутренняя труба выполнена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т ($d = 20$ мм – наружный диаметр; $\delta = 2$ мм – толщина стенки), наружная – из оптически прозрачного кварцевого стекла ($D = 50$ мм – внутренний диаметр). Заподлицо с наружной поверхностью внутренней трубы установлены ГДТП из монокристаллического висмута размерами $7 \times 4 \times 0,4$ мм (рис. 1, б и в). Четыре ГДТП расположены на расстоянии 100 мм, 200 мм, 300 мм и 400 мм от верхнего среза измерительного участка. Для уменьшения искажений в течении конденсата ГДТП смонтированы со смещением в 30° по азимутальному углу φ . Диаметрально противоположно ГДТП на внутренней и наружной поверхности трубы установлены термопары типа L.

Во внутреннюю трубу подается охлаждающая вода, в межтрубное пространство – насыщенный водяной пар. Измерены расходы охлаждающей воды и конденсата, температура теплоносителей на входе и выходе из измерительного участка с помощью NTC-термисторов, температуры вблизи ГДТП – с помощью термопар медь-алюмель.

Регистрация сигналов ГДТП и термопар выполнена на плату PXI-6289 National Instruments с частотой записи 500 Гц и на модернизированный светолучевой осциллограф Н-145, применение аналогового прибора исключило влияние электромагнитных помех.

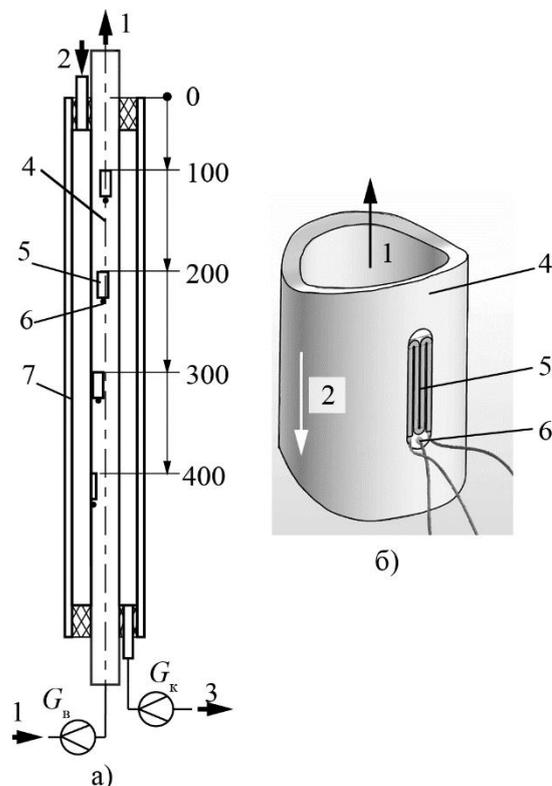


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и принципиальная схема установленного на поверхность ГДТП (б). Цифрами обозначены: 1 – охлаждающая вода; 2 – пар; 3 – конденсат; 4 – труба из нержавеющей стали; 5 – ГДТП; 6 – термопара; 7 – кожух

Таким образом, в эксперименте совмещены возможности градиентной теплотометрии, термометрии и визуализации течения конденсата. Результаты экспериментов подтвердили применимость и перспективность градиентной теплотометрии в области мониторинга теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара.

Список литературы:

1. Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement / S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020.
2. Sapozhnikov, S.Z.; Mityakov, V.Y.; Mityakov, A.V.; Babich, A.Y.; Zainullina, E.R. An investigation into film condensation of saturated steam on tube surfaces by a gradient heatmetry // Therm. Eng. 2021. 68, 794–801.
3. Zainullina, E.R., Mityakov, V.Y. Heat Transfer Investigation during Condensation on the Horizontal Pipe // Inventions. 2023. 8, 2.

Исследование выполнено при поддержке гранта
РНФ 22-29-00152

УДК 532

ДИНАМИКА РОСТА ОДИНОЧНОГО ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Зорькина А.И.^{1,2}, Роньшин Ф.В.^{1,2}, Кабов О.А.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Кипение – процесс, встречающийся во многих областях промышленности. В частности, теплообменные системы с фазовыми переходами активно используются в космической отрасли. Но из-за сложности проведения экспериментов, количество работ по влиянию гравитации на процесс кипения ограничено, и требуются дополнительные исследования. Для данных целей в 2019 году запущен эталонный многомасштабный эксперимент по кипению на МКС [1, 2].

В существующих корреляциях для тепловой стадии роста пузыря на поверхности нагрева диаметр пропорционален квадратному корню от времени. Лабунцов и Ягов [3] вывели зависимость, учитывающую испарение микрослоя, образовавшегося между основанием пузыря и поверхностью нагрева и испарение с межфазной границы по контуру пузыря, работающую в широком диапазоне изменения числа Якоба (0,1 – 500).

Экспериментальная ячейка заполнена рабочей жидкостью FC-72. На подложку из кристалла фторида бария, прозрачную в ИК-диапазоне, нанесен слой нитрида хрома толщиной 400 нм, увеличивающий степень черноты, и слой хрома толщиной 400 нм, служащий джоулевым нагревателем. Через некоторое время, после включения нагревателя, называемое в данной работе временем ожидания, в его центре – каверне, глубиной 200 мкм, с помощью лазерного импульса инициализируется паровой пузырь. Установка снабжена скоростными инфракрасной с частотой 240 Гц, регистрирующей поле температур нагревателя, и черно-белой с частотой 500 Гц, записывающей форму растущего пузыря, камерами. Подробное описание установки и обработка данных представлены в [1, 2]. В настоящей работе исследуется зависимость роста парового пузыря от следующих параметров эксперимента: давление жидкости p (500-1000 мбар), температура недогрева T_{sub} (1-5 °C), время ожидания t_{wait} (2-5 с), длительность лазерного импульса $t = 20$ мс, тепловой поток с нагревателя $q = 0,5$ Вт/см².

Для калибровки ИК-камеры проведен численный расчет поля температур нагревателя до момента образования пузыря, т. е. за время t_{wait} , что позволило с хорошей точностью определить распределение температуры нагревателя и ее зависимость от времени. Исследована динамика роста одиночного парового пузыря. Диаметр пузыря аппроксимируется методом наименьших квадратов степенной зависимостью от времени. Выявлено, что весь период роста пузыря можно разбить на три стадии (см. рис. 1). На первом этапе, длительностью менее 100 мс, пузырь растет под воздействием лазерного импульса, за счет которого температура нагревателя в области каверны резко возрастает. В некоторых случаях, за счет инерционных

эффектов, пузырь может оторваться от поверхности. Вторая стадия – переходная, длится 1 – 2 с. Сначала температура нагревателя под пузырем падает из-за диссипации энергии лазера и затем начинает постепенно возрастать за счет джоулева нагрева, при этом изменение температуры не существенно, по сравнению с третьей стадией роста. Степень t для данного этапа лежит в пределах от 0,49 до 0,55. Третья стадия – рост под действием постоянного теплового потока с поверхности нагревателя, занимает 7-8 с, степень t изменяется от 0,58 до 0,73.

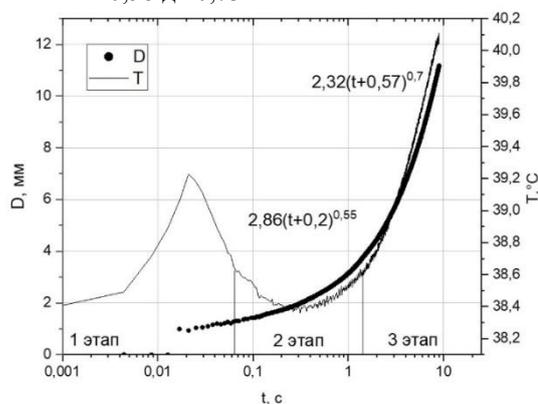


Рис. 1. Зависимость диаметра пузыря D и средней температуры нагревателя под пузырем T от времени для $p = 500$ мбар, $t_{wait} = 2$ с, $T_{sub} = 1$ °C,

Исследована зависимость скорости роста пузыря от параметров эксперимента: диаметр увеличивается с уменьшением давления, увеличением времени ожидания и уменьшением недогрева.

Проведено сравнение полученных данных с корреляцией Ягова и Лабунцова. Число Якоба в экспериментах изменялось в пределах от 1,4 до 6. Корреляция Ягова и Лабунцова хорошо согласуется с экспериментальными данными при эмпирически подобранных коэффициентах, отвечающих за испарение с межфазной границы и испарение микрослоя.

Список литературы:

1. Sielaff A. et al. The multiscale boiling investigation on-board the International Space Station: An overview //Applied thermal engineering. 2022. С. 117932.
2. Oikonomidou O. et al. Bubble growth analysis during subcooled boiling experiments on-board the international space station: Benchmark image analysis //Advances in Colloid and Interface Science. 2022. С. 102751.
3. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. М.: МЭИ, 2000. 374 с.

Исследование выполнено за счёт гранта
Российского научного фонда № 21-79-10357,
<https://rscf.ru/project/21-79-10357/>

УДК 536.248

ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ РАСПАДЕ НЕУСТОЙЧИВЫХ РАСТВОРОВ В УСЛОВИЯХ МОЩНОГО ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

Игольников А.А., Скрипов П.В.

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Доклад посвящен вопросам повышения производительности современных микрофлюидных устройств, сопряженным с более общей проблемой отведения тепловых потоков большой плотности. Многообразие конструктивных особенностей теплопередающих устройств и температурно-временных условий тепловыделения делает обоснованным привлечение новых подходов и повышение резерва возможностей уже зарекомендовавших себя теплофизических методов. В известных классификациях методов усиления теплопереноса (см., например, [1]) не уделено должного внимания новым типам веществ, ранее не использовавшимся в качестве охладителя. За рамками упомянутой классификации остались перспективные, на наш взгляд [2], частично-смешиваемые растворы с нижней критической температурой растворения, кратко, НКТР. Перегрев таких растворов из однофазной области в область за спиноподалью жидкость-жидкость переводит их в кратковременно неустойчивое состояние. Оно характеризуется существенным приращением энергии, выделяемой при распаде неустойчивого раствора на две жидкие фазы [2]. Основным механизмом распада служит спиноподальный распад.

В докладе рассмотрено явление перегрева растворов с НКТР относительно спиноподали жидкость-жидкость и теплового эффекта, сопровождающего распад неустойчивого раствора. Исследование выполнено методом управления импульсного нагрева проводочного зонда – термометра сопротивления. Основные результаты получены на водных растворах полипропиленгликоля ППГ-425.

Эксперимент распадается на два направления:

- построение расширенной фазовой диаграммы с вовлечением в обсуждение кратковременно-неустойчивых состояний раствора;
- изучение теплоотдачи к таким растворам относительно их устойчивых состояний и чистых компонентов в сопоставимых условиях тепловыделения.
- В ходе исследования были протестированы следующие гипотезы:
- о возможности кратковременного существования раствора в области термодинамически неустойчивых состояний и принципиальной измеримости теплоотдачи к раствору в данной области;
- о возможности расширения фазовой диаграммы раствора за счет области неустойчивых состояний: построение приближения для диффузионной и механической спиноподали, а также для критической кривой жидкость-пар;
- о пороговом изменении характеристик теплопереноса при распаде неустойчивого состояния системы.

Возможны два подхода к построению расширенной фазовой диаграммы раствора с НКТР. Первый состоит в построении фазовой диаграммы идеализированной системы. Он подразумевает исключение релаксации состава системы, сопровождающей нагрев. В нашем случае, это спиноподальный распад и, возможно, терморазрушение ППГ в области малых содержаний воды в растворе. Такой подход свойственен для теоретических построений. В эксперименте это требование эквивалентно малым характерным временам воздействия (очень высоким скоростям нагрева), что нецелесообразно в силу ряда причин. Второй подход, выбранный нами, настроен на прямое экспериментальное изучение реальной системы, где степень ее распада не является нулевой, но сводится к минимуму благодаря выбору параметров нагрева.

В докладе обсуждены данные о теплоотдаче растворов с НКТР в ходе их перегрева и релаксации. Для систем с содержанием 20 и 30 вес.% ППГ-425 был получен уникальный результат. Несмотря на большую плотность теплового потока, заданную в опыте (от 9.2 до 13.7 МВт/м²), температурные кривые показали тенденцию к выходу на насыщение. Данное обстоятельство свидетельствует о пороговом усилении теплоотдачи с поверхности нагревателя. Рост коэффициента теплоотдачи, вероятно, связан со спиноподальным распадом неустойчивой системы. Картина теплообмена оказалась устойчивой к изменению параметров нагрева. В итоге, полученные результаты указывают на перспективность данных растворов в качестве теплоносителя в процессах мощного локального тепловыделения. Для уточнения таких перспектив, важно расширить диапазон типов тепловыделяющих элементов, характерных времен и степени перегрева, в том числе, за счет вовлечения в исследование других групп. Доклад приурочен к 70-летию защиты В.П. Скриповым пионерской в области теплофизических свойств не вполне устойчивых растворов диссертации [3, 4].

Список литературы:

1. Igolnikov A.A., Skripov P.V. Characteristic Features of Heat Transfer in the Course of Decay of Unstable Binary Mixture // *Energies*. 2023. V. 16. 2109. <https://doi.org/10.3390/en16052109>
2. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 2. С. 280-312. DOI: 10.31857/S0040364421020149
3. Skripov P.V. Thermophysical Properties of Liquids in Not Fully Stable States—From the First Steps to the Current Trends // *Energies*. 2022. V. 15. 4440. <https://doi.org/10.3390/en15124440>
4. Скрипов В.П. Теплоемкость жидких двойных смесей в критической области расслаивания // *Дисс. ... к.ф.-м.н., МГУ, 1953*. <https://disk.yandex.ru/i/-GmlJ115OErjQ>

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 19-19-00115,
<https://rscf.ru/project/19-19-00115/>*

УДК 536.24

ТЕПЛООБМЕН МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Комов А.Т., Дедов А.В., Щербаков П.П., Захаренков А.В., Штелинг В.С., Соколова А.Д.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Быстрое развитие мощных электронных, энергетических установок и двигателей привело к тому, что характеристики этих систем стали ограничены возможностями теплосъема. Современная электроника может генерировать тепловые потоки до 10 МВт/м^2 , которые при этом необходимо отводить с минимальным расходом теплоносителя. Использование фазового перехода позволяет теплосъему диспергированным потоком достигать высокой плотности теплового потока. Этот метод доказал свою эффективность в различных областях применения. Тем не менее, теплосъем и эффективность теплоотвода распылением нуждаются в дальнейшем улучшении, чтобы соответствовать требованиям энергетических установок следующего поколения со сверхвысокой мощностью. Разработка свойств и структур поверхности, которая обеспечивается современными технологиями производства, может существенно повлиять на взаимодействие диспергированного потока и стенки, что становится наиболее многообещающим способом охлаждения. Однако механизмы охлаждения распылением с улучшенными теплофизическими свойствами поверхности разнообразны и неоднозначны. Анализ экспериментальных данных на структурированных поверхностях показывает, что охлаждение диспергированным потоком может обеспечить максимальный тепловой поток выше 10 МВт/м^2 при коэффициенте теплоотдачи, достигающим $60 \text{ кВт/(м}^2\cdot\text{К)}$ [1].

Для диспергированного охлаждения водой структурированных поверхностей получен большой разброс данных как по коэффициентам теплоотдачи, так и по максимальным тепловым потокам [1]. Большинство экспериментальных и численных исследований в области диспергированного охлаждения посвящено изучению спреев, формируемых одиночным соплом [2-3]. Для однофазных режимов такой способ охлаждения изучен достаточно основательно [4-5]. Однако, как можно увидеть из обзорной статьи [1], режим диспергированного охлаждения при температурах поверхности выше температуры насыщения жидкости активно изучается, и многие авторы получают неоднозначные результаты, касающиеся как максимальной плотности теплового потока, так и его эффективности.

Данная работа будет направлена на экспериментальное исследование процессов повышения эффективности теплообмена диспергированным потоком с помощью модификации теплообменных поверхностей в условиях сверхвысоких тепловых потоков. На первом этапе проекта рассматривается модификация поверхности макроструктурой с размером неоднородности до 1 мм.

На рис. 1 приведена принципиальная схема экспериментального стенда для исследования теплосъема от структурированной поверхности с высокой температурой при ее охлаждения диспергированным потоком теплоносителя. Данный экспериментальный стенд включает в себя гидравлический контур, систему индукционного нагрева, систему сбора и обработки информации и экспериментальную камеру. Давление в контуре теплоносителя (дистиллированной воды) может изменяться в диапазоне $p = (0,1 \div 1,5) \text{ МПа}$, что при использовании различных распыляющих устройств (форсунок) позволяет регулировать расход теплоносителя в большом диапазоне.

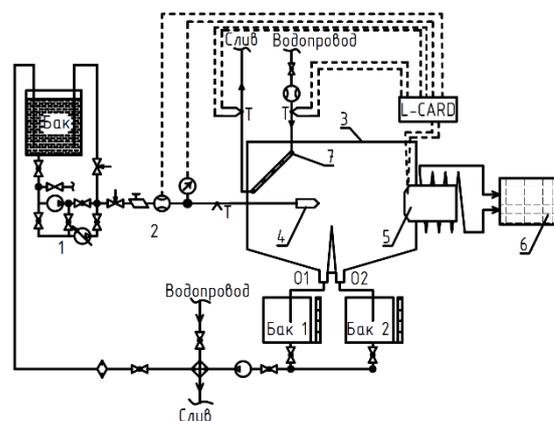


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – насосная система, 2 – запорно-регулирующая арматура и устройства измерения параметров теплоносителя, 3 – экспериментальная камера, 4 – форсунка, 5 – рабочий участок с модифицированной поверхностью, 6 – ВЧ-генератор, 7 – меевиковый конденсатор.

Список литературы:

1. R. Xu, G. Wang, P. Jiang. Spray Cooling on Enhanced Surfaces: A Review of the Progress and Mechanisms. Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME. 2022. V.144(1). 010802
2. S. Feng, L. Xiao, Z. Ge, L. Yang, X. Du, H. Wu. Parameter analysis of atomized droplets sprayed evaporation in flue gas flow/ International Journal of Heat and Mass Transfer. Elsevier Ltd. 2019. V. 129. p. 936–952
3. Y. Wang, M. Liu, K. Xu, Y. Chen. Experimental study on the effects of spray inclination on water spray cooling performance in non-boiling regime. Experimental Thermal and Fluid Science. Elsevier Inc. 2010. V.34, №7. p.933–942.
4. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. The effect of confinement on the flow and turbulent heat transfer in a mist impinging jet. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. V.54, №19-20. p.4266-4274.
5. Caliskan S., Baskaya S., Calisir T. Experimental and numerical investigation of geometry effects on multiple impinging air jets. International Journal of Heat and Mass Transfer. Elsevier Ltd. 2014. V. 75. pp. 685-703.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-19-00476

УДК 536.24

**ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА НА МЕЖФАЗНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КОНДЕНСАТ – ПАР:
ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ****Крюков А.П.¹, Пузина Ю.Ю.¹, Жаховский В.В.², Левашов В.Ю.³**¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Российская Федерация, Москва, ул. Красноказарменная, 14² Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова,
127055, Российская Федерация, Москва, ул. Сущевская, 22,³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Институт механики,
119192, Российская Федерация, Москва, Мичуринский проспект, 1

Общеизвестно, что процессы испарения, конденсации и кипения активно используются в различных областях техники, что обуславливает актуальность представляемой работы. В первой части доклада планируется кратко изложить историю и основные итоги развития исследований явлений переноса на границах раздела фаз пар-жидкость. Подробно этот материал изложен в статье [1], опубликованной в начале 2021 года.

Вторая часть посвящена проведенным за последние два года теоретическим и экспериментальным исследованиям межфазных процессов: рассматривается несколько задач по следующему алгоритму. Постановка – физическая модель – методы решения – математическое описание: система уравнений, начальные и граничные условия – результаты – их анализ: сравнение с экспериментальными данными, выделение предельных случаев, определение областей правомерности и применения, формулирование недостатков и возможных путей их преодоления.

В первой из рассматриваемых задач исследуется эволюция пленки пара на поверхности шарового нагревателя с учетом неравновесных эффектов на границе раздела жидкость-пар. Описание таких процессов уже не может осуществляться только методами механики сплошной среды, а должно сопровождаться молекулярно-кинетическим подходом, свободным от ограничений по степени неравновесности. Математическое описание рассматриваемой сопряженной задачи: нагреватель - паровая пленка – жидкость состоит в сочетании механики сплошных сред (МСС) с методами молекулярно-кинетической теории (МКТ), позволяющими сформулировать граничные условия для уравнений МСС. Полученная таким образом замкнутая система уравнений позволяет найти зависимость координаты межфазной поверхности жидкость-пар, а значит и толщины паровой пленки, от времени. Осуществлено сопоставление найденных решений с экспериментальными данными о кипении сверхтекучего гелия (гелия II).

Вторая задача – определение величины максимального удельного теплового потока при кипении гелия II, так называемой первой критической плотности. Поскольку пузырькового кипения в сверхтекучем гелии нет, постольку актуальной становится проблема выяснения механизма формирования самой паровой фазы на греющей поверхности, что составляет предмет этой задачи. Методами молекулярной динамики (МД) показано для высокотеплопроводной среды, моделирующей гелий II, что в отличие от обычных жидкостей формирующиеся паровые образования имеют

другую «блино-подобную» форму, причем их развитие и объединение осуществляется преимущественно не в нормальном направлении, а вдоль поверхности нагревателя.

Третья задача – динамика межфазной поверхности гелий II – пар в U-образном канале большого диаметра при подаче тепловой нагрузки от нагревателя, размещенного во входном сечении одного из каналов. Экспериментально обнаружены устойчивые колебания этой поверхности, которые не наблюдаются в обычных жидкостях. В первом приближении осуществлены соответствующие расчеты.

Четвертая задача – дозвуковая и сверхзвуковая конденсация пара на поверхности. Модифицирована процедура численного решения кинетического уравнения Больцмана (КУБ) моментным методом и подтверждены результаты, полученные первым автором более тридцати лет назад. Осуществлено МД моделирование этих процессов, показавшее согласие с решениями КУБ. Продемонстрирована правомерность применения формул Т.М. Муратовой и Д.А. Лабунцова [2] для определения интенсивности конденсации насыщенного пара даже высокой интенсивности.

Пятая задача – выяснение влияния объемной конденсации на интенсивность испарения с поверхности. В свое время [2, 3] теоретически и экспериментально было показано, что пар, образующийся в результате испарения с поверхности жидкости или твердого тела, например, в результате лазерного облучения, является пересыщенным, что обуславливает возможность гомогенной конденсации. Совместное применение классической теории гомогенной нуклеации и МКТ позволило получить оценки степени влияния такой конденсации на интенсивность испарения для различных веществ.

Список литературы:

1. Крюков А.П., Левашов В.Ю., Жаховский В.В., Анисимов С.И. Тепло и массоперенос на межфазных поверхностях конденсат-пар. // Успехи Физических Наук. 2021. Т.191. №2. С. 113-146.
2. Муратова Т.М., Лабунцов Д.А. Кинетический анализ процессов испарения и конденсации. // Теплофизика высоких температур. 1969. Т.7. № 5. С. 959-967.
3. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: «Наука», 1970.

*Работа выполнена при поддержке
Российского научного фонда:
проекты № 23-29-00342 и № 22-19-00044*

УДК 536.423

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОКАНАЛЬНЫХ И МИКРОСТРУЙНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Кузнецов В.В., Шамирзаев А.С., Мордовской А.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Повышение тепловыделения в элементах энергетического и электронного оборудования обуславливает необходимость поиска эффективных способов отвода высоких тепловых потоков от локальных источников тепла. В этих условиях традиционные методы воздушного охлаждения становятся малоэффективными и необходимо переходить к жидкостным системам охлаждения. Применение микроканалов в данных условиях, которые имеют большую удельную поверхность, ограничено преждевременным кризисом кипения, поэтому использование гибридных систем, сочетающих в себе преимущества микроканалов и затопленных натекающих микроструи, является более эффективным способом отвода высоких тепловых потоков в бескризисном режиме теплообмена [1].

Целью данной работы является сравнительный анализ эффективности теплообмена при недогретом кипении воды в щелевом сегментированном микроканале и при натекании затопленных микроструй в щелевом микроканале. Эксперименты проводились для горизонтального сегментированного микроканала с зазором 340 мкм и при натекании системы микроструй на поверхность медной мишени в щелевом канале с зазором 1000 мкм.

Рабочий участок (мишень) для исследования теплообмена при недогретом кипении воды в сегментированном щелевом микроканале представлял собой медный блок с двумя микроканалами длиной 16 мм, шириной 2 мм и глубиной 340 мкм, закрытыми верхней крышкой из полированной нержавеющей стали. Микроканалы изготовлены фрезерованием, их внутренняя поверхность покрыта слоем никеля и наноструктурным слоем SiO₂ с толщиной 20 мкм. Тепловой поток к основанию микроканалов поступает от нагревательных элементов, по длине блока расположены 4 термопары для определения плотности теплового потока и температуры стенки микроканалов.

Рабочий участок для изучения теплообмена при натекании системы локализованных и распределенных микроструй в щелевом микроканале представлял собой медный цилиндр диаметром 10 мм. По длине цилиндра размещены 4 термопары для определения плотности теплового потока, поступающего от нагревателей, и температуры поверхности мишени.

На рис. 1 приведено сравнение экспериментальных и расчетных кривых кипения для охлаждения мишени водой с температурой 250С при использовании 36-ти струй диаметров 174 мкм и скорости жидкости в струях 3 м/с. Струи расположены на расстоянии 1 мм друг от друга, Пунктирной линией показан расчет кривой кипения в условиях большого объема, сплошной линией показан расчет кривой кипения в условиях недогрева по модифицированному методу [2] с учетом [3]. Как видно, при охлаждении поверх-

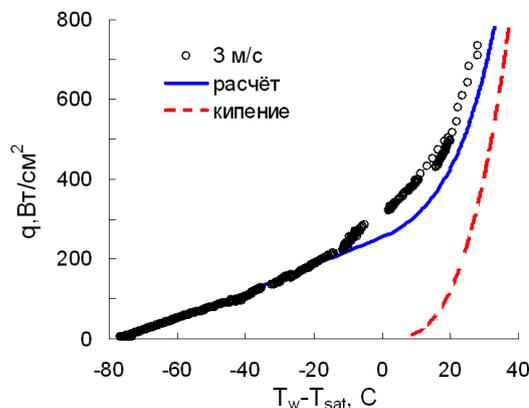


Рис.1. Сравнение экспериментальных и расчетных кривых кипения при охлаждении мишени водой для 36 струй.

ности натекающими микроструями наблюдается значительная интенсификация теплообмена по сравнению с теплообменом при кипении в большом объеме.

Получены кривые кипения для системы распределенных микроструй диаметром 174 мкм и 6-ти локализованных по кругу микроструй диаметром 327 мкм при скорости жидкости в струях до 12 м/с. Сравнение кривых кипения для охлаждения водой мишени в условиях вынужденной конвекции в сегментированном щелевом микроканале и для микроструйного охлаждения показало, что микроканальный теплообменник с увеличенной входной камерой и большим отношением сторон каналов имеет более высокую эффективность отвода тепла за счет подавления преждевременного кризиса кипения. Сравнение данных для охлаждения мишеней примерно равной площади показывает, что микроканальное охлаждение водой позволяет отвести от мишени 479,3 Дж/г тепла при массовой скорости 500 кг/м²с по сравнению с 264,6 Дж/г для локализованной системы шести затопленных микроструй с диаметром 327 мкм при скорости жидкости 6 м/с. Это показывает более эффективное охлаждение в случае микроканалов, но при существенно более высокой температуре стенки.

Список литературы:

1. Sung M.K., Mudawar I. Single-phase hybrid micro-channel/microjet impingement cooling // Int. J. Heat Mass Transf. 2008. V. 51. P. 4342-4352.
2. Liu Z, Winterton R.H.S. A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli // Int. J. Heat Mass Transf. 1991. V. 34. P. 2759-2766.
3. Fabbri M., Dhir V.K. Optimized heat transfer for high power electronic cooling using arrays of microjets // J. Heat Transfer. 2005. V.127. P.760-769.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет
гранта Российского научного фонда
(проект № 21-19-00626)

ДИНАМИКА РОСТА ПАРОВОГО ПУЗЫРЬКА ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ЦЕНТРОВ НУКЛЕАЦИИ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВЫСТУПЕ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ

Левин А.А.^{1,2}, Хан П.В.^{1,2}, Сафаров А.С.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

² Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Как показано в обзоре [1] структурирование поверхности путем создания геометрии с размерами элементов $10^{-6} \div 10^{-3}$ м улучшает характеристики теплопередачи при кипении за счет увеличения плотности зародышеобразования или увеличения площади теплообмена, в то время как критический тепловой поток в некоторой степени возрастает. В работе [2] изучалось влияние геометрии впадин теплоотдающей поверхности на теплообменные характеристики. Авторы использовали единственный вариант расположения пузыря – в центре впадины, глубина составляла 0,25 мм, а ширина варьировалась до 0,5 мм. Рост пузырька на одиночной впадине исследовался экспериментально Ignácio и др. [3]. Стоит отметить, что в вышеуказанных работах не уделялось внимание вариативности местоположения начального парового зародыша.

Другой слабоизученной стороной в вопросе влияния микрогеометрии на пузырьковое кипение является нестационарный характер теплового потока. Известен эффект увеличения критического теплового потока при нестационарном тепловыделении. При этом ограниченность современных теоретических представлений, способных предсказывать возникновение кризиса кипения в потоке недогретой жидкости [4] является основанием для углубленного изучения процесса кипения на металлической поверхности в условиях, когда достигаются высокие тепловые потоки. Обширное развитие средств численных реализаций математических моделей, а также расширение требований к детализации предсказательных моделей вызвали большой интерес к созданию новых подходов [5]. В представленном докладе рассматриваются результаты численного моделирования нестационарного вскипания недогретой жидкости на геометрически неоднородной поверхности. Рассматриваются несколько вариантов возникновения парового зародыша: в центре впадины, в углу впадины, на ребре выступа и в центре цилиндрического выступа (рис.1). Изучается динамика роста и микроконвекция в окрестности пузыря с целью вскрытия механизмов интенсификации теплообмена.

Для создания математической модели используется ПО COMSOL Multiphysics. На поверхности нагревателя скорость жидкости равна нулю, а температура поверхности определяется в результате решения нестационарного уравнения теплопроводности с заданным объемным тепловыделением в металле. Поверхность раздела жидкой и паровой фаз определяется методом Level-Set. Уравнение Навье-Стокса решается в ламинарном приближении, без дополнительных уравнений турбулентности. Плотность, вязкость, теп-

лопроводность и теплоёмкость смеси заданы в терминах свойств жидкой и паровой фазы, и функции уровня. Перенос тепла и массы за счет фазового перехода заданы как пространственные источники. Давление принято равным атмосферному 0,1 МПа. Начальная температура жидкости и поверхности нагревателя равны 30°C. Рост температуры нагревателя принимает значения $103 \div 104$ К/с. Расчет роста паровой фазы начинался при достижении температуры T_{onb} . При появлении, паровая фаза занимала небольшую область в различных позициях относительно выступов на поверхности нагревателя, с диаметром 0,01 мм.

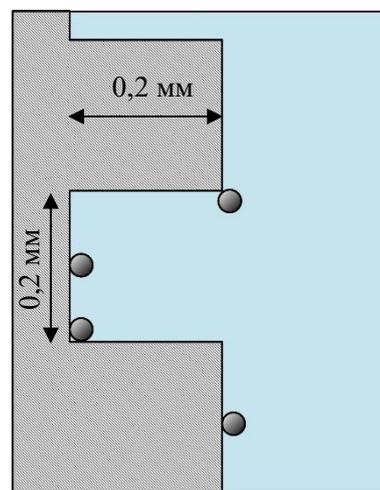


Рис. 1. Схема вариантов расположения парового зародыша на начальной стадии численного моделирования роста пузыря.

Список литературы:

1. Huaqiang Chu, Xinyu Yu, Hantao Jiang, Dongdong Wang, Nian Xu. Progress in enhanced pool boiling heat transfer on macro- and micro-structured surfaces // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023. V.200. 123530.
2. Mu Y.T. et al. Nucleate boiling performance evaluation of cavities at mesoscale level // Int. J. Heat Mass Transf. Elsevier Ltd. 2017. V.106. P.708–719
3. Ignácio I. et al. Vapor bubble nucleation dynamics in a single artificial cavity. 2021. July. Conference: 15th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT 2021)
4. Levin A.A., Khan P.V. Characteristics of nucleate boiling under conditions of pulsed heat release at the heater surface // Appl. Therm. Eng. 2019. V.149. P. 1215–1222.
5. Hansch S. et al. Microlayer models for nucleate boiling simulations: The significance of conjugate heat transfer // Int. Top. Meet. Nucl. React. Therm. Hydraul. 2015. NURETH 2015. 2015. V.6. P.4848-4861.

Работа выполнена при поддержке
РНФ проект №22-19-00092

УДК 548.562

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗНОГО СООТНОШЕНИЯ ВОДЫ С ДОБАВЛЕНИЕМ SDS НА ПРОЦЕСС ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ СЖИЖЕННОГО ГИДРАТООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА В ОБЪЕМЕ ВОДЫ**Мелешкин А.В., Марасанов Н.В.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Газовые гидраты представляют собой клатратные соединения с решетчатой структурой, которые состоят из решетки-"хозяина" и молекулы-"гостя". Они образуются путем включения каркасом из молекул воды молекул гидратообразующего газа, при определенных термодинамических условиях для каждого газа, и могут содержать в себе значительные объемы газа. При нарушении условий, гидрат разлагается на воду и газ с поглощением тепла. Газогидратные технологии могут быть использованы в различных сферах экономики, таких как транспортировка и хранение природного газа, разделение газов, опреснение морской воды и т.д. Однако, для эффективного использования этих технологий необходимо разработать быстрые и эффективные способы получения газогидратов.

Текущие методы получения газогидратов основаны на различных технологиях, таких как мелкодисперсное распыление воды, насыщенной газом-гидратообразователем, интенсивном перемешивании воды, вибрационном и ультразвуковом воздействии на жидкость, т.д. Однако эти методы имеют один существенный недостаток - низкую производительность из-за малой скорости гидратообразования. В данной работе исследован новый метод, который основан на взрывном вскипании гидратообразующего газа в воде. Этот метод обеспечивает быстрый рост гидратной массы за короткий промежуток времени. Для запуска процесса производится декомпрессия рабочей зоны, вызывающая вскипание сжиженного газа и интенсивное перемешивание среды, что приводит к формированию развитой межфазной поверхности и образованию гидратных оболочек на поверхности пузырьков, которые отслаиваются и освобождают место для контакта газа с водой. Этот метод обладает высокой производительностью благодаря быстрому росту гидратной массы по всему объему воды.

Новизной данной работы является исследование разрабатываемого метода гидратообразования с добавлением кинетического промотора додецилсульфат натрия (SDS). Добавка ускоряет рост газового гидрата, что обусловлено увеличением растворимости гидратообразующего газа и снижении поверхностного натяжения, в результате чего площадь контакта воды и газа не покрывается непроницаемой твердой пленкой, что затруднило бы диффузию газа в воду, а растет в виде пористой поверхности.

Данная работа является частью комплексного исследования метода получения газовых гидратов, основанного на процессе кипения сжиженного гидратообразующего газа в объеме воды вызванного сбросом давления из рабочего участка. В качестве гидратообразующего газа был использован фреон 134а. Работа

выполнялась в установке, представляющей собой сосуд высокого давления (автоклав) из нержавеющей стали с рабочей областью диаметром 0,1 м и высотой 0,3 м. Охлаждение рабочего объема осуществлялось путем циркуляции теплоносителя через рубашку охлаждения, расположенную на внешней стороне сосуда. За поддержание температуры и прокачку теплоносителя отвечал термостат LOIP FT 316-40, измерение температуры производилось с помощью термомпары Pt100, в качестве датчика давления выступал ОВЕН ПД-100. Сброс давления осуществлялся с расходом 100 л/мин.

Методика проведения эксперимента проводилась следующим образом. В рабочий объем экспериментальной установки помещался раствор с варьируемой массой от 50 г до 200 г, затем установка герметично закрывалась. Раствор представлял собой воду с растворенным в ней додецилсульфатом натрия (SDS) с концентрацией 500 ppm. Далее происходило охлаждение раствора. После достижения температуры жидкости 8°C, в рабочий объем установки накачивалось 100 г фреона R134a. Затем, при достижении раствором температуры 6 °C, осуществлялся сброс давления из установки до давления 0,1 МПа, вызывая вскипание сжиженного газа с одновременным отводом тепла, в результате чего в камере установки начинал происходить рост газового гидрата. Для определения коэффициента конверсии газа в газогидратное состояние относительно начальной массы газа проводилось его разложение путём нагрева. После прекращения роста гидрата криостат включался в режим нагрева, постепенно повышая температуру на рабочем участке, в результате чего система выходила из термобарической зоны стабильности гидрата, что приводило к его диссоциации, которая сопровождалась выделением газа. Высвобожденный газ создавал дополнительное избыточное давление в системе, по которому определялась масса высвобожденного газа и соответственно его доля относительно начальной массы газа.

В рамках данного исследования были определены коэффициенты конверсии гидратообразующего газа относительно начальной массы газа 100 г для раствора массой 50, 100, 150 и 200 г. Наилучшее значение было достигнуто при массе раствора 150 г, при котором коэффициент достигал значений 14%. Дальнейшее увеличение массы газа существенно не влияло на результат. Также была определена высвобожденная в результате образования гидрата теплота, по которой был оценен его прирост.

*Работа выполнена по госконтракту с ИТ СО РАН
(№ 121031800216-1)*

УДК 548.562

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНО АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА ДОДЕЦИЛСУЛЬФАТ НАТРИЯ НА ПРОЦЕСС ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ

Мелешкин А.В., Марасанов Н.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В течение длительного времени тематика газовых гидратов привлекает внимание специалистов со всего мира. Ранние исследования направлены на предотвращения гидратных отложений в трубопроводах при добыче газа в северных регионах, которые могли привести к закупориванию магистральных газовых трубопроводов и, как следствие, к дорогостоящим работам по устранению аварии. Также в газогидратном состоянии находится порядка 80% всего природного газа в виде полезного ископаемого в зонах вечной мерзлоты и на дне океанического шельфа. Для поиска подобных месторождений и попытки добычи газа ведущими странами создаются национальные программы. Исследования искусственных (техногенных) газовых гидратов имеет большие перспективы в различных отраслях промышленного производства, например, свойства газовых гидратов можно использовать для транспортировки и хранения газов, опреснения и очистки воды, аккумуляции холода, разделение газов и т.д. Однако, процесс получения газового гидрата сложен и требует существенных энергозатрат. Существующие методы, такие как мелкодисперсное распыливание струи жидкости в атмосфере газа, интенсивное перемешивание и т.п. недостаточно эффективны в плане скорости образования гидрата. Коллективом авторов был разработан метод получения газовых гидратов, основанный на кипении сжиженного газа в объеме воды при сбросе давления. Интенсивное кипение сжиженного газа приводит к созданию развитой межфазной поверхности вследствие кипения газа, интенсивного отвода тепла, поглощаемого фазовым переходом. При этом в системе заведомо находится избыток газа. Наложение этих факторов приводит к интенсификации процесса гидратообразования.

Новизной данной работы является исследование разрабатываемого метода гидратообразования с добавлением кинетического промотора додецилсульфат натрия (SDS). Добавка ускоряет рост газового гидрата, что обусловлено увеличением растворимости гидратообразующего газа и снижении поверхностного натяжения, в результате чего площадь контакта воды и газа не покрывается непроницаемой твердой пленкой, что затруднило бы диффузию газа в воду, а растет в виде пористой поверхности.

Данная работа является частью комплексного исследования метода получения газовых гидратов, основанного на процессе кипения сжиженного гидратообразующего газа в объеме воды, вызванного сбросом давления из рабочего участка. В качестве гидратообразующего газа был использован фреон 134а. Экспериментальная установка представляет собой резервуар из нержавеющей стали, рассчитанный на высокие давления (автоклав), оснащенный герметичной

крышкой с зажимным фланцем и рубашкой охлаждения. Высота рабочей области установки составляет 300 мм, а диаметр – 100 мм. Температурный режим установки поддерживается за счет циркуляции теплоносителя через рубашку охлаждения, за что отвечает криостат LOIP FT 316-40. Измерение давления и температуры осуществлялось с применением датчиков типа ОВЕН ПД-100 и Pt100 соответственно.

В установку заливался раствор массой 200 г с различным уровнем концентрации додецилсульфата натрия (SDS) от 0 ppm до 1500 ppm. Установка герметично закрывалась и происходило дальнейшее охлаждение раствора до температуры 8 °С. Затем в рабочий объем установки накачивался фреон R134a массой 200 г. При достижении температуры жидкости 6 °С производился сброс давления до уровня 0,1 МПа, что приводило к вскипанию сжиженного газа и инициировало процесс образования газового гидрата. По завершению процесса гидратообразования осуществлялся прогрев всего рабочего объема экспериментальной установки с целью разложения гидрата.

В рамках данного исследования были определены коэффициенты конверсии гидратообразующего газа и воды относительно их начальной массы при концентрации SDS 0, 250, 500, 750, 1250 и 1500 ppm (Рис. 1). При этом отчетливо виден тренд увеличения доли газогидрированной воды при увеличении концентрации SDS. Увеличение концентрации выше 750 ppm практически не влияет на дальнейший рост коэффициентов, которые остаются на уровне 80% для Kw и 20% для Kg.

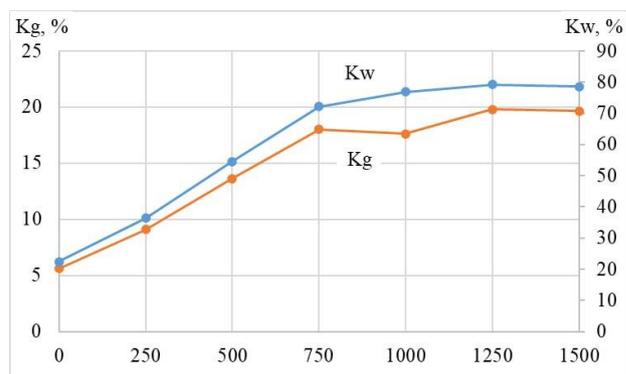


Рис. 1. Коэффициенты конверсии газа (Kg) и воды (Kw) в газовый гидрат относительно начальной массы при различной концентрации SDS.

Работа выполнена по госконтракту с ИТ СО РАН
(№ 121031800216-1)

УДК 621.9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ НИСХОДЯЩЕГО ПАРА ПЕНТАНА НА ПОВЕРХНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА МЕТОДОМ VOF

Минко К.Б., Клементьев А.А., Андреев С.Н.

ФГБОУ ВО “НИУ “МЭИ”,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

В последнее десятилетие метод Volume Of Fluid (VOF) [1], дополненный моделями и алгоритмами для расчета фазовых переходов, превратился в эффективный инструмент исследования процессов конденсации как внутри труб, так и на их внешней поверхности. В недалекой перспективе этот метод позволит получить детальную информацию о процессах конденсации движущегося пара на поверхности гладких и оребренных трубных пучков. Для достижения этой цели необходимы тщательные и методические численные исследования процессов конденсации на отдельных трубах и фрагментах пучков при различных направлениях и режимах течения пара.

В [2] авторы настоящей работы выполнили моделирование и провели валидацию модели VOF и модифицированной модели Lee [3] на задаче о конденсации насыщенного пара на одиночном цилиндре (вода и пентан при 0,1 МПа и скорости до 3 м/с). В работе [2] течения пара и жидкой пленки считались ламинарными, т.к. до точки отрыва пограничный слой пара при рассмотренных режимных параметрах остается ламинарным. При моделировании течения пара во фрагментах пучков труб следует учитывать возможность турбулентного режима. Известно [4], что использование некоторых моделей турбулентности не позволяет с приемлемой точностью моделировать течения, в которых режим течения пленки является ламинарным, а поток пара – турбулентным. Целью настоящей работы является изучение влияния выбора модели турбулентности на результаты расчетов конденсации пара на одиночном цилиндре методом VOF.

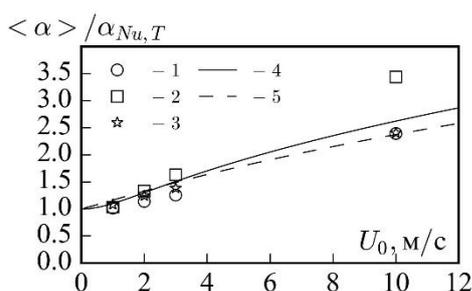


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости пара: 1 – $k-\omega$ модель с модификацией Егорова, 2 – $k-\omega$ SST модель, 3 – ламинарное течение пара, 4 – [9], 5 – [10]. Конденсация пентана при 0,1 МПа и $\Delta T=20^\circ\text{C}$.

В работе представлены данные численном моделировании конденсации пара из нисходящего турбулентного потока пентана на поверхности горизонтального цилиндра диаметром 25,4 мм. Постановка задачи

соответствует [2]. Пентан движется сверху вниз со скоростью до 10 м/с. Для моделирования турбулентного переноса использовались две модели турбулентности из реализованных в CFD-коде ANES [5]: SST-модель [6]; $k-\omega$ модель [7] с модификацией Егорова [8]. Также рассматривался вариант ламинарного течения пара. Полученные зависимости среднего коэффициента теплоотдачи $\langle \alpha \rangle$, отнесенного к значению, рассчитанному по формуле Нуссельта ($\alpha_{Nu,T}$), от скорости набегающего потока представлены на рис. 1 для $\Delta T = 20^\circ\text{C}$. На этом же рис. 1 нанесены кривые, соответствующие известным соотношениям [9, 10].

Видно, что при скоростях до 3 м/с полученные результаты согласуются между собой и с расчетами по соотношениям [9, 10]. С ростом скорости пара результаты расчета с использованием SST-модели приводят к более высоким коэффициентам теплоотдачи. В докладе обсуждаются локальные характеристики жидкой пленки и причины различия полученных результатов расчетов теплоотдачи.

Список литературы:

- Hirt C.W. Nichols B. Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys. 1981. V. 39. Is. 1. P. 201–225.
- Минко К.Б., Артемов В.И., Клементьев А.А. Моделирование методом VOF процессов конденсации неподвижного и движущегося насыщенного пара на поверхности горизонтальной трубы // Теплоэнергетика. 2023 г. №3. С. 20-39.
- Lee W.H. A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling / Multiphase transport: fundamentals, reactor safety, applications / Ed. by T.N. Veziroglu. Washington, DC: Hemisphere Publishing, 1980. P. 407–432.
- Моделирование процессов конденсации хладонов в вертикальных трубах методом VOF / К.Б. Минко, В.И. Артемов, Г.Г. Яньков, Птахин А.В. // Теплоэнергетика. 2023. №7. (в печати)
- Код ANES. [Электрон. ресурс.] <http://anes.ch12655.tweb.ru/>
- Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. V. 32 P.1598–1605.
- Wilcox D.C Turbulence Modeling for CFD, second ed., DCW Industries, Inc., La Cañada, CA, USA, 1998. a.
- Egorov Y., Validation of CFD codes with PTS-relevant test cases, Contact condensation in stratified steam-water flow, EVOL-ECORA-D 07, 2004.
- Fujii T., Uehara H., Kurato C. Laminar filmwise condensation of flowing vapour on a horizontal cylinder // Int. J. Heat Mass Transfer. 1972. V. 15. Is. 2. P. 235–246.
- Rose J.W. Effect of pressure gradient in forced convection film condensation on a horizontal tube // Int. J. Heat Mass Transfer. 1984. V. 27. Is. 1. P. 39-47. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(84\)90235-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(84)90235-7).

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(грант № 22-29-01457,
<https://rscf.ru/project/22-29-01457/>)

УДК 691.175

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ И ПОЛИМЕРИЗАЦИИ КАПЛИ РАСТВОРА H₂O/PEGDA/IRGACURE ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Мисюра С.Я., Бильский А.В., Гобызов О.А., Рябов М.Н., Морозов В.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

На сегодняшний день фотоотверждаемые гидрогели на полимерной основе стали перспективными материалами для создания 3D-структур для различных биомедицинских приложений: тканевая инженерия, регенеративная медицина, доставка лекарств и биосенсоры [1, 2]. Фотоотверждаемые гидрогели образуются при реакции полимеризации под воздействием видимого или ультрафиолетового излучения на водный раствор с форполимером (основа) со сшивающим агентом (фотоинициатором) [1]. На практике наиболее часто используются гидрогели на основе: полиэтиленгликоля диакрилата (PEGDA), желатина метакрилоила (GelMA) и метакрилизованной гиалуроновой кислоты (MeHA) [3]. В качестве сшивающих агентов применяют Irgacure 2959, Литий фенил-2,4,6-триметилбензоилфосфинат (LAP) и эозин-У [4].

Изменять механические и структурные свойства фотоотверждаемых гидрогелей можно путем варьирования мощности и длительности экспозиции, концентрации компонентов раствора, а также вида основы и сшивающего агента в целом [4].

Целью данной экспериментальной работы является исследование испарения и полимеризации сидячих капель раствора H₂O/PEGDA/Irgacure 2959 (массовая концентрация C₀ = 49,5/49,5/1%) под воздействием УФ-излучения. В качестве опорных были использованы данные, полученные при испарении капли деионизированной воды с тем же объемом, что и раствор H₂O/PEGDA/Irgacure.

На рис. 1 приведен спектр излучения УФ-лампы. Как видно из полученного спектра УФ-излучение находится в диапазоне длины волны 350-400 нм, что соответствует ближнему УФ-излучению. Спектр излучения лампы был нормирован на максимум, и непосредственно мощность излучения не измерялась.

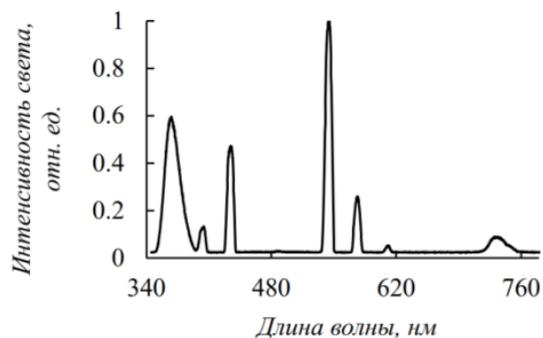


Рис. 1. Спектр излучения лампы.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные по изменению безразмерной массы капли дистиллята и водного раствора по времени при воздействии УФ-излучения. Мгновенную массу капли m измеряли с помощью гравиметрического метода (электронные весы ViBRA AJH-620CE, дискретность 0,001 г). После

размещения капли на керамическую подложку включалась камера с расположенными внутри 2 лампами LUF-20 (мощность каждой 9 Вт). Высота от керамической поверхности подложки до ламп 32 мм. Для равномерного освещения капли внутренняя стенка камеры была покрыта светоотражающей фольгой. Температура нагрева поверхности сухой стенки от ламп $T_w = 28-30$ °С. Температура межфазной поверхности каплей измерялась с помощью тепловизора.

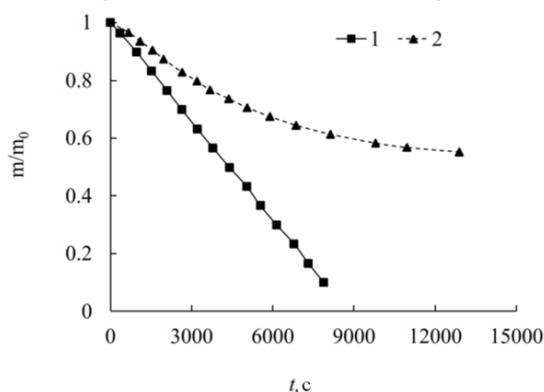


Рис. 2. Изменение безразмерной массы по времени (m_0 — начальная масса капли, $V_0 = 600$ мкл, $T_w = 28-30$ °С: 1 — вода; 2 — H₂O/PEGDA/Irgacure ($C_0 = 49.5/49.5/1\%$)).

Капля воды (рис. 2) нагревалась в течение 5–10 с, после чего температура поверхности повышалась за счет уменьшения высоты капли при испарении. Масса капли с течением времени испарения имеет квазилинейный характер. Для раствора полимеризация началась через 20-30 с после воздействия УФ-излучения. Полимеризация раствора начиналась вблизи центра капли. Температурный фронт полимеризации двигался от центра к краю капли в течение 10-15 с. В отличие от капли воды полимеризация гидрогеля сопровождается образованием пор [5], которые препятствуют испарению воды с поверхности капли гидрогеля. После 1300 с. m капли перестает изменяться.

Список литературы:

1. Choi J.R., et. al. Recent advances in photo-crosslinkable hydrogels for biomedical applications // BioTechniques. 2019. V. 66. P. 40–53.
2. Annabi N., et. al. 25th Anniversary article: Rational design and applications of hydrogels in regenerative medicine // Adv. Mater. 2014. V. 26, P. 85–124.
3. Li J., et. al. 3D printing of hydrogels: Rational design strategies and emerging biomedical applications // Mater. Sci. Eng. R. 2020. V. 140. P. 100543.
4. Yu C., et. al. Photopolymerizable biomaterials and light-based 3d printing strategies for biomedical applications // Chem. Rev. 2020. V. 120. P. 10695–10743.
5. Lin S., et. al. Influence of physical properties of biomaterials on cellular behavior // Pharm. Res. 2011. V. 28. P. 1422–1430.

Работа поддержана РФФ
(грант № 21-19-00732)

УДК 536.242

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ГАЗОКАПЕЛЬНОМ СТАЦИОНАРНОМ ОРОШЕНИИ ПЛОСКОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Назаров А.Д.¹, Миськив Н.Б.¹, Серов А.Ф.¹, Мамонов В.Н.¹, Старинская Е.М.¹, Сендир Е.А.²

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, Пирогова, 1

Для охлаждения относительно больших поверхностей исследователи, как правило, используют несколько сопел [1, 2]. Большинство доступных литературных данных об охлаждении распылением от одиночного источника, связаны с охлаждением небольших поверхностей. Литературных данных, посвященных охлаждению больших по площади теплоотводящих поверхностей очень мало. Особенно недостаточно исследований по охлаждению таких поверхностей газокапельным потоком от одного источника (форсунки).

Между тем, применение одиночных источников для охлаждения поверхности имеет ряд преимуществ. За счет дробления жидкой фазы, выходящей из форсунки, на мелкие капли с достаточно равномерным распределением капель в факеле распыла, происходит увеличение отношения площади орошаемой поверхности к расходу жидкости, и обеспечивается более равномерное распределение отводимого тепла в пространстве. Кроме того, более низкое потребление жидкостной компоненты влечет за собой меньшие энергозатраты на перекачку и рециркуляцию охлаждающей жидкости и, следовательно, повышение общей энергетической эффективности процесса [2, 3].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию теплообмена при режимах до и около пузырькового кипения при газокапельном стационарном орошении плоского теплообменника с относительно большой площадью поверхности, равной $S = (0,14 \times 0,14) \text{ м}^2$.

В экспериментальном исследовании теплообменник представляет собой фольгу толщиной 50 мкм технического титана ВТ1-0 с шероховатостью поверхности 6-8 мкм [4]. Модель теплообменника установлена вертикально. Газокапельный поток, направленный перпендикулярно к поверхности, формируется полноконусной двухфазной форсункой ВКТSS4230 с соплом ВКТSS422-1. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, газовая фаза – воздух. Расход жидкости варьировался в диапазоне $Q = 0,98 - 1,7 \text{ г/с}$ и регулировался точным поддержанием избыточного давления обеих фаз от 1 до 3 атм. на входах форсунки. Расстояние между источником газокапельного потока до теплообменника выбрано такое, чтобы круг конуса потока вписывался в квадрат теплообменника.

Теплообменник нагревается источником постоянного тока. Плотность теплового потока определяется: $q = \frac{U \cdot I}{S} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$, U и I – падение напряжения на модели теплообменника при протекании через него тока; S – площадь теплообменной поверхности. Относительная

погрешность измерения величины теплового потока в экспериментах составляет 5%.

Для каждого режима работы форсунки (расход жидкости и газа) теневым методом с помощью высокоскоростной камеры определены распределение по диаметрам и скорость капель при выходе из форсунки и в сечении потока на расстоянии установки теплообменника.

Для измерения поля температуры тепловыделяющей поверхности в исследовании была использована скоростная ИК-камера FLIR Titanium HD 570M с частотой съёмки 1 кГц и разрешением 145 мкм/пикс. Камера устанавливалась с обратной стороны поверхности, непосредственно контактирующей с теплоносителем.

На основе ИК измерений были получены поля температур тепловыделяющей поверхности. Наблюдается некоторая разница в величинах температуры поверхности в центре и периферии тепловыделяющей области, что обусловлено неравномерным распределением плотности потока капель по периметру области орошения, но эта разница не превышает 5°C.

С использованием тепловых измерений для ряда режимных параметров работы источника потока (форсунки) были построены зависимости плотности теплового потока от перегрева поверхности теплообменника относительно температуры набегающего потока: $\Delta T = T_w - T_f$. Для расчётов проводилось усреднение температурного поля нагревателя по площади и времени. В качестве температуры набегающего газокапельного потока принималась температура нагревателя при подаче спрея без нагрева. Поскольку поля температур зарегистрированы с обратной стороны нагревателя (T_{IR}), стационарная температура поверхности, контактирующая с газокапельным потоком, с учетом толщины стенки (δ) и теплопроводности материала (λ), получена по закону Фурье: $T_w = T_{IR} - \frac{q\delta}{\lambda}$.

Список литературы:

1. Minle Bao, Feng Wang, Yali Guo, Luyuan Gong and Shengqiang Shen. Experimental study of two-phase heat transfer of droplet impact on liquid film. *Phys. Fluids*. 2022. 34. 042119.
2. Liang G., Mudawar I. Review of spray cooling – Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. 115. P. 1174-1205.
3. Nazarov A.D., Miskiv N.V., Surtaev A.S. and Serdyukov V. S. Characterization of Multi-Jet Cooling Using High-Speed Visualization and IR Thermography. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2019. V. 28, No.4. P. 489-498.
4. Чернов И.П., Белоглазова П.А., Березнева Е.В., Киреева И.В., Пушилина Н.С., Ремнёв Г.Е., Степанова Е.Н. Свойства поверхности титана ВТ1-0, модифицированной импульсным ионным пучком. *Журнал технической физики*. 2015. Т.85. В.7. С.95-99.

УДК 536.248.2

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПЛЁНОЧНОГО ОРОШЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ С РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ

Павленко А.Н., Катаев А.И., Миронова И.Б.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

При интенсификации процесса теплообмена при кипении важнейшими параметрами являются масштаб и тип шероховатости поверхности, подробно рассмотренные и исследованные в [1] и [2]. Существует достаточно много способов создания поверхностей с искусственной шероховатостью. Однако, во многих промышленных применениях всё же используют поверхности, получаемые с использованием обычных процессов механической обработки [1], а в кожухотрубных плёночных теплообменниках, как правило, используются необработанные трубы большой длины.

Исследуются два простых способа интенсификации теплообмена: пескоструйная и токарная обработка (стандартная шероховатость) наружной поверхности теплообмена. Трубы с наружным диаметром 10 мм, толщиной стенки 2 мм и длиной 625 мм тестируются в составе вертикального пакета горизонтальных труб в прямоугольном объёме испарителя. В качестве рабочего вещества в испарителе используется фреон R21 при абсолютном давлении 3 бара. Эксперименты проводились при числах Рейнольдса от 500 до 1500. ($Re = \Gamma/\mu$).

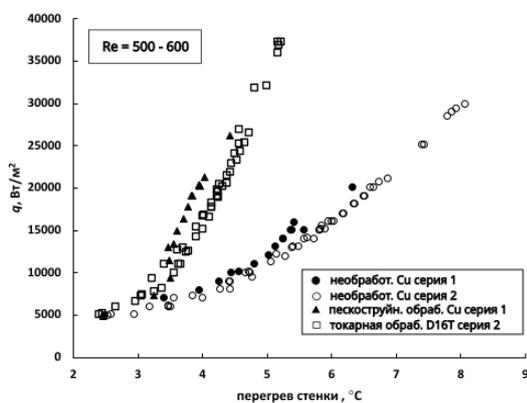


Рис. 1. Зависимость плотности теплового потока от перегрева стенки для труб разной шероховатости при числах Рейнольдса в диапазоне 500 – 600.

Из представленных графиков (рис. 1 - 2) видно, что в области перегревов стенки ниже 3.5°C данные по теплообмену для всех исследованных труб полностью совпадают. В этой области теплообмен происходит в режиме испарения. При перегреве стенки выше 3.5°C наблюдается быстрый переход к кипению на трубах с искусственной шероховатостью. На трубе с естественной шероховатостью (необработанной) наблюдается плавный переход от испарения к кипению в области

перегревов стенки в диапазоне от 3.5 до 6°C. В области теплообмена при развитом пузырьковом кипении интенсификация теплоотдачи достигает 2 раз.

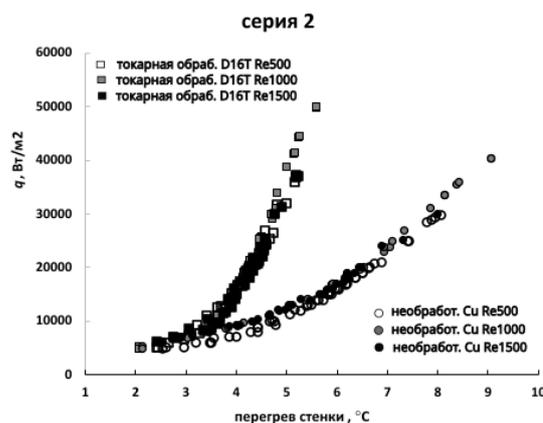


Рис. 2. Зависимость плотности теплового потока от перегрева стенки трубы для серии 2 (медная необработанная труба и дюралюминиевая труба, обработанная на токарном станке) для всех исследованных чисел Рейнольдса.

Выводы:

- Поверхности с искусственной шероховатостью, полученные с использованием простых механических методов обработки (пескоструйная и токарное резание) в стандартной области шероховатостей ($R_a \sim 10$ мкм, $R_z \sim 40$ мкм) обеспечивают 2-кратную интенсификацию теплоотдачи по сравнению с необработанной трубой ($R_a \sim 3.2$ мкм). Интенсификация теплопередачи в области развитого кипения достигает 25%.
- Не наблюдается влияния числа Рейнольдса на интенсивность теплообмена и на переход от испарения к кипению для всех исследованных труб (см. рис. 2).

Список литературы:

1. Benjamin J. Jones, John P. McHale, Suresh Garimella, 2009 The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Birck and NCN Publications. 2009. Paper 480.
2. Bradley D. Bock, Josua P. Meyer, John R. Thome Falling film boiling and pool boiling on plain circular tubes: Influence of surface roughness, surface material and saturation temperature on heat transfer and dryout Experimental Thermal and Fluid Science V.109. 2019. 109870.

Работа выполнена в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН при финансовой поддержке Государственного Контракта с ИТ СО РАН № 121031800216-1

УДК 536.24

ИЗМЕРЕНИЕ МЕСТНОГО КОЭФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ ПРИ КОПЕНИИ ВОДЫ С ДОБАВЛЕНИЕМ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ Al_2O_3

Павлов А.В., Бобылев П.Г., Сапожников С.З.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт – Петербург, ул. Политехническая, 29

Многие экспериментальные работы по теплообмену при кипении используют термометрию как метод исследования. Существуют эмпирические зависимости, позволяющих оценивать плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи (КТО) по значениям температуры на классических поверхностях [1,2]. Расчет теплообмена на поверхностях сложной формы таким методом затруднен. Комплексное использование градиентной теплотметрии и термометрии позволяет однозначно зафиксировать плотность теплового потока и температуру поверхности независимо от формы модели.

Градиентная теплотметрия использует гетерогенные градиентные датчики теплового потока, действие которых основано на поперечном эффекте Зеебека [3].

Экспериментальной моделью служил цилиндр из титана ВТ-22 диаметром 34 мм и высотой 22,3 мм, на верхнем торце которого установлены гетерогенный градиентный датчик теплового потока (медь+никель) и термопара (медь+алюмель). Нагретая модель опускалась в сосуд с жидкостью объемом 10 л. Запись сигналов термопары и датчика производилась на National Instruments PXI-4461 с частотой записи 5000 изм./с.

В наших экспериментах на воде [4] совмещение высокоскоростной визуализации, градиентной теплотметрии и термометрии позволили установить границы режимов кипения (рис. 1).

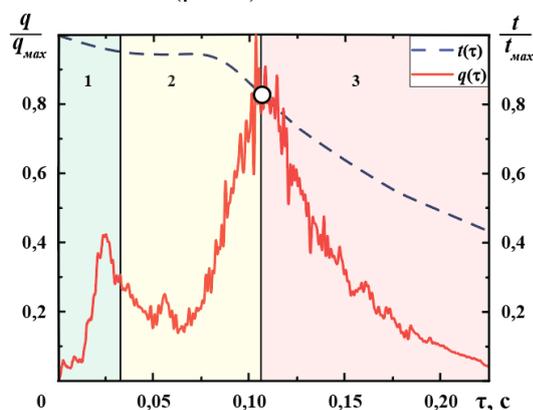


Рис. 1. Зависимость плотности теплового потока и температуры от времени [4].

В областях 1 (плотное кипение) и 2 (переходный режим) температура жидкости вблизи модели принимается равной температуре насыщения, что позволяет рассчитать КТО. На рис.1 точкой указаны плотность

теплового потока и температура, при которых начинается режим развитого пузырькового кипения.

Рассмотрено влияние размера частиц Al_2O_3 на КТО при развитом пузырьковом кипении недогретой жидкости. Начальная температура модели 464 °С, температура жидкости 64, 73, 80 °С, массовая концентрация частиц 0,32 %. Максимальный размер микрочастиц 1 мкм, наночастиц 54 нм. Для всех режимов получены зависимости, аналогичные представленной на рис.1. Рассчитанные по этим данным КТО для рассмотренных режимов представлен на рис.2.

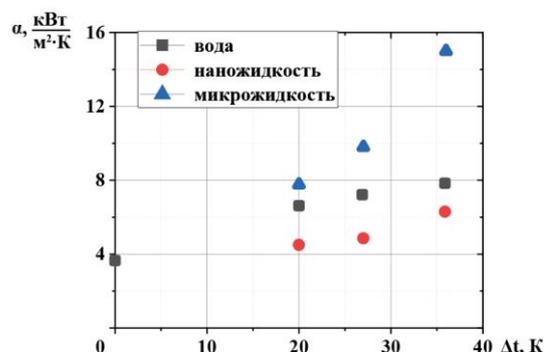


Рис. 2. Зависимость КТО от размера частиц и недогрева жидкости.

Взвесь микрочастиц увеличивает КТО при кипении до 48 %, а добавка наночастиц снижает КТО на 32%. Таким образом, размер частиц-интенсификаторов является основополагающим фактором, определяющим интенсификацию теплообмена при кипении недогретой жидкости.

Список литературы:

1. Experimental evaluation of constants for the Rohsenow poolboiling correlation / I.L. Piot// Int. J. Heat Mass Transfer 42 (1999)
2. Нестационарный теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости // Ягов В. В., Забиров А. Р., Лексин М. А. / Теплоэнергетика, 2015, № 11, с. 70 – 80.
3. Heatmetry The Science and Practice of Heat Flux Measurement / Sapozhnikov S.Z., Mityakov V. Yu., Mityakov A.V. // St.-Petersburg, Springer International Publishing, 2020. 209 p.
4. Исследование кипения на поверхности шара методом градиентной теплотметрии / Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Гусаков А.А., Павлов А.В., Бобылев П.Г. // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. №10. С. 434–441.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-29-00160

УДК 536

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАЕМОЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ.

Пещенюк Ю.А.¹, Куракин А.Ю.¹, Айвазян Г.Е.², Гатапова Е. Я.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Национальный политехнический университет Армении,
610101, Армения, Ереван, ул. Теряна, 105

Испарение капель играет определяющую роль в различных практических приложениях, таких как спрейное охлаждение [1, 2], струйная печать, создание биосенсоров и микрочипов и др. Несмотря на существенный прогресс в исследованиях испаряющихся капель, многие задачи в данной области остаются до конца не решенными [3]. Это обусловлено сложными гидродинамическими и тепломассообменными процессами, происходящими при взаимодействии, капли с нагретой подложкой и окружающей средой. В связи с этим основной целью данной работы является количественное исследование температурного поля на поверхности испаряющейся нагреваемой капли жидкости.

Рассматривается капля жидкости на нагреваемой подложке. На Рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, состоящая из рабочего участка, источника питания, инфракрасной (ИК) камеры FLIR X6530sc и ПК. Рабочий участок состоит из бокса, покрытого поглощающим свет в видимом и инфракрасном диапазоне материалом. На нижней стороне подложки закреплялся тонкопленочный нагреватель с помощью термоскотча. Температура подложки контролировалась термопарой К-типа. Было реализовано две конфигурации для ИК съемки: сверху и сбоку. В качестве исследуемых образцов были выбраны две подложки: стекло с покрытием из графита и черный кремний (b-Si). В качестве рабочей жидкости была использована вода Milli-Q.

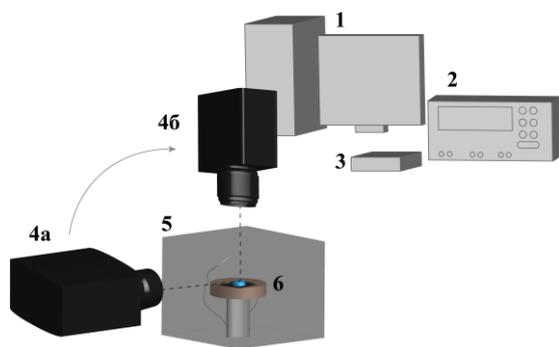


Рис.1. Схема экспериментальной установки: а) съемка сбоку, б) съемка сверху. 1 – ПК, 2 – Источник тока, 3 – АЦП, 4а – тепловизор, 4б – тепловизор, 5 – Бокс, 6 – подложка с нагревателем.

Анализ полученных изображений был проведен в специализированном ПО Flir Altair и ImageJ. Частота съемки варьировалась от 100 до 430 Гц.

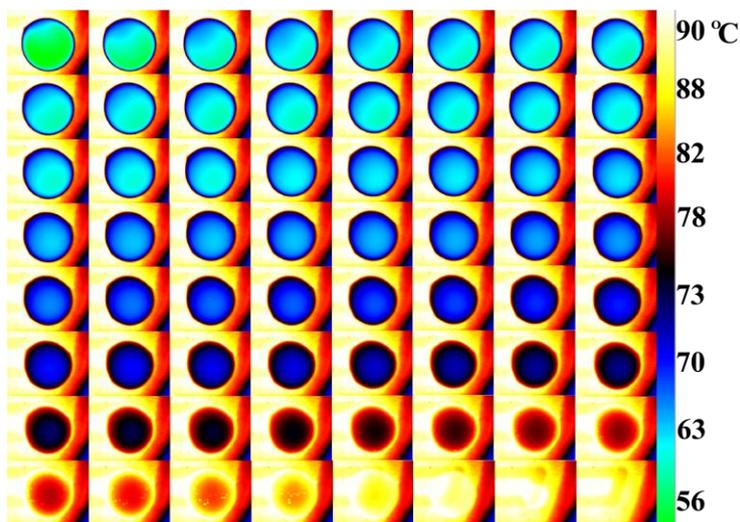


Рис.2. Термограммы для капли воды на подложке из b – Si при температуре $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

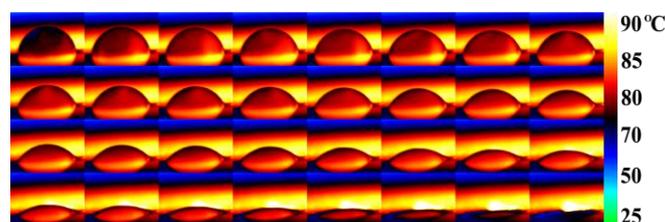


Рис.3. Термограммы для капли воды при съемке сбоку на стеклянной подложке при $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По полученным термограммам была исследована скорость контактной линии, градиент температуры по толщине капли при съемке сбоку и на поверхности капли воды при съемке сверху.

Список литературы:

1. Mudawar I., Estes K.A. Optimizing and predicting CHF in spray cooling of a square surface // J. of Heat Transfer. 1996. Vol. 118, No. 3. P. 672–679.
2. Khandekar S., Muralidhar K., Sahu G., Gataпова E.Ya., Kabov O.A., Hu R., Luo X., Zhao L. Cooling of high-power LEDs by liquid sprays: challenges and prospects // Applied Thermal Engng. 2021. V.184. P. 115640-1-115640-22.
3. Peschenyuk Y. A. et al. The final stage of droplet evaporation on black silicon by schlieren technique with a graded filter // Experiments in Fluids. 2023. T. 64. №. 1. C. 1.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 20-19-00722)

УДК 536.242

УСИЛЕНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ЗА СЧЕТ РАСПАДА НЕСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ РАСТВОРА**Поволоцкий И.И., Волосников Д.В., Скрипов П.В.**Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Задача отведения тепловых потоков большой плотности актуальна для устройств с малым характерным размером и, как следствие, с коротким временем отклика. В таких устройствах не исключена вероятность мощного тепловыделения, вплоть до 10 МВт/м², с импульсным или периодическим режимом. В случае миниатюрных электронных устройств и микросхем, геометрически стесненная площадь теплообмена и применение традиционных теплоносителей с кипящим слоем создают условия для локального перегрева и нарушение температурного режима. Трудноосуществима возможность создания искусственных неровностей в микроканале теплообменника для турбулизации потока жидкости. Альтернативой могут выступать двухкомпонентные растворы с ограниченной областью совместимости компонентов в координатах температура-концентрация. При пересечении границы сосуществования фаз такие смеси разделяются на две жидкие фазы. Процесс разделения может происходить либо путем зародышеобразования, либо спиноподобного распада. Спиноподобный распад, инициированный в маловязких системах, является естественным турбулизатором в заданных условиях потока теплоносителя [1].

Цель работы состояла в изучении характерных черт теплоотдачи к импульсно перегретым (относительно линии равновесия жидкость-жидкость и диффузионной спиноподобности) водным растворам с нижней критической температурой растворения (НКТР) в сопоставлении с теплоотдачей, наблюдаемой в чистых компонентах при одинаковых условиях опыта, в том числе, на фоне фазового перехода жидкость-жидкость и спиноподобного распада. Работа является естественным развитием исследования, начатого в [2].

Постановка опытов была осуществлена методом управляемого импульсного нагрева проволочного зонда, погруженного в исследуемую жидкость, а именно, в режиме термостабилизации при достижении температурой зонда заданного значения T_{st} [3]. Суть измерительной процедуры состоит в записи мощности $P(t; T_{st})$, требуемой для поддержания постоянства температуры T_{st} и отслеживания ее изменения при изменении параметра опыта, то есть, давления или концентрации. Первичными данными опыта служат падение напряжения на зонде $U(t)$ и ток в цепи зонда $I(t)$. По первичным данным опыта рассчитываются значения сопротивления зонда $R(T)$, его температуры $T_{st}(t)$ и электрической мощности $P(t; T_{st})$, генерируемой для её поддержания. Далее рассчитывается

средняя (по поверхности зонда) плотность теплового потока и мгновенный коэффициент теплоотдачи $K_T(t)$, как основная переменная в опытах с мощным тепловыделением, при заданном температурном напоре.

Объектами исследования являлись водные растворы: полипропиленгликолей (ППГ) со среднечисловой молекулярной массой $M_n = 425, 725$ и 2000, монобутилового эфира этиленгликоля (2-бутоксизанола) и 2,6-лутидина. Для исключения самопроизвольного вскипания водных растворов опыты проводились при давлениях, превышающих критическое давление.

Наиболее сильная интенсификация (до 2,5 раз) наблюдалась в водных растворах ППГ при концентрации ППГ (10-30) % и $T_{st} = 225-300^\circ\text{C}$. В случае водных растворов 2-бутоксизанола и 2,6-лутидина, масштабы неустойчивых состояний и интенсификации оказались значительно меньше. В среднем, увеличение составило (60 – 80) % относительно аддитивных значений.

В целом, эксперименты с не вполне стабильными и нестабильными водными растворами (ППГ-425, ППГ-725, ППГ-2000, 2-бутоксизанола и 2,6-лутидина) показали сложный характер распада таких растворов. В связи с этим было начато моделирование теплообмена при их импульсном нагреве и спиноподобном распаде расслаивающихся растворов [4].

По результатам опытов выяснена обоснованность выбора в качестве теплоносителя водных растворов с НКТР в интервале концентраций от левой ветви спиноподобности до критической концентрации раствора.

Авторы выражают благодарность Елиной Светлане Юрьевне за помощь в исследовательской работе.

Список литературы:

1. Xing W., Plawsky J., Woodcock C., Yu X., Ullmann A., Brauner N., Peles Y. Liquid-liquid phase separation heat transfer in advanced micro structure // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V.127. P.989-1000.
2. D.V. Volosnikov, I.I. Povolotskiy, P.V. Skripov Enhancement of Heat Transfer Due to Decay of Unstable State of Solution // J. Engin. Thermophys. 2023. V 32. P. 1–14.
3. Скрипов П.В., Старостин А.А., Волосников Д.В. Перенос тепла в импульсно перегретых жидкостях // ДАН. 2003. Т.390. С.192-195.
4. Skripov P.V., Igolnikov A.A., Rutin S.B., Melkikh A.V. Heat transfer by unstable solution having the lower critical solution temperature // Int. J. Heat Mass Transfer. 2022. V.184. P. 122290.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 19-19-00115,
<https://rscf.ru/project/19-19-00115/>*

УДК 536.423.1

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ТЕПЛООБМЕНА НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КИПЕНИЯ

Попов И.А., Аксянов Р.А., Лэй Р.А., Степанова Ю.С., Федорова С.А.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

В связи с ростом единичной мощности энергоустановок, увеличением мощности микропроцессорной техники, развитием химической промышленности необходимы компактные высокоэффективные системы охлаждения. Данные проблемы решаются с использованием жидкостных систем охлаждения с фазовыми переходами, включая паровые камеры, термосифоны и тепловые трубы, иммерсионные или погруженные системы охлаждения. В них реализуется режим кипения рабочих жидкостей для повышения уровня отводимых тепловых нагрузок, в том числе кипение на интенсифицированных поверхностях с микрорельефами. Развитие технологий позволяет создавать поверхности кипения самой различной структуры. Сегодня накоплен большой банк данных исследований теплоотдачи и критических тепловых потоков на нано- и микроструктурированных поверхностях, однако рекомендаций по выбору типа поверхности и прогнозирования уровня интенсификации теплоотдачи и повышения критических тепловых потоков мало.

В докладе дан краткий анализ результатов экспериментальных исследований теплоотдачи при кипении различных жидкостей на модифицированных поверхностях. При выполнении обзора все поверхности были разделены на три группы:

1. нано- и микроструктурированные поверхности с элементами шероховатости менее диаметра зародыща $2r^*$ парового пузырька – улучшающие смачиваемость поверхности и приводящие к увеличению КТП при сохранении и снижении КТО. Примерно значение данного радиуса сопоставимо с минимальными размерами центров парообразования (шероховатости);

2. микроструктурированные поверхности с элементами шероховатости сопоставимыми с постоянной Лапласа l_0 , обеспечивающими капиллярный эффект под паровыми пузырьками и снабжающие жидкостью область испарения, что приводит к увеличению КТП и КТО. Использование капиллярной постоянной в качестве масштаба нормирования позволяет разделить микроканальные структуры на капилляры и собственно сосуды. Отнесение элемента микроструктурированной поверхности к капилляру определяется соотношением его поперечного линейного размера и капиллярной постоянной;

3. макроструктурированные поверхности с оребрением поверхности, обеспечивающем только развитие

поверхности теплообмена и, тем самым, отводимую поверхностью тепловую мощность.

На основе полученных данных сформированы базы данных по коэффициентам теплоотдачи и критическим потокам при кипении различных жидкостей на нано- и микроструктурированных поверхностях.

В ходе исследования проведено сопоставление уровней коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков при кипении различных жидкостей в условиях свободной конвекции. Проведено обобщение экспериментальных данных по указанным параметрам с целью выявления зависимости их от геометрических и режимных параметров для дальнейшего прогнозирования теплообмена в системах охлаждения и выбора рациональных параметров поверхностей кипения. Обобщение проводилось с использованием многомерного регрессионного анализа. Для выполнения регрессионного анализа и вычисления коэффициентов регрессии модели обобщения приводились к линеаризованной форме посредством ее логарифмирования, определения коэффициентов и обратного приведения к степенной зависимости.

В настоящее время проведено обобщение данных и выработаны рекомендации при использовании микроструктурированных поверхностей с двух- и трехмерными элементами, полученными методом деформирующего резания и фрезерования; столбчатыми наноструктурами; проволочными щеточными микро- и нанопроволочными структурами.

Проведена оценка возможности использования методов искусственной нейронной сети для обобщения экспериментальных данных. Для удобства проведения прогнозирования теплообмена при кипении разработан компьютерное веб-приложение для поиска наиболее эффективных геометрических параметров. Оно включает базу экспериментальных данных, выбор типа поверхности кипения и геометрических и режимных параметров, методы обработки данных с использованием регрессионного анализа и нейронной сети, вывода данных по интенсификации теплообмена и повышению критических тепловых потоков при использовании различных методов прогнозирования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Минобрнауки России в рамках исполнения
обязательств по выполнению обязательств
по Соглашению №075-03-2023-032*

УДК 536.24

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ И ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ ТЕПЛООБМЕНА В ПАРОВЫХ КАМЕРАХ

Пуховой М.В., Быковская Е.Ф., Кабов О.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Существует значительное количество техник охлаждения существенно теплонагруженных миниатюрных устройств. Одной из них является использование паровой камеры. В данном обзоре концептуально рассмотрен большой пласт соответствующих экспериментальных работ, изучавших двухфазное охлаждение с применением паров различных жидкостей, в которых преодолен порог в отводе удельного теплового потока величиной более 1 МВт/м². Выполнено сравнение охлаждения при использовании паровой камеры с другими современными техниками охлаждения.

Как и другие двухфазные системы охлаждения, типичная паровая камера, смотри Рис.1, состоит из испарителя, конденсатора, капиллярной конструкции и адиабатического кожуха. Вместе с тем, она имеет очень простую конструкцию с небольшим количеством движущихся частей или совсем без них. Фазовый переход происходит в испарителе и конденсаторе, причем испаритель непосредственно прикреплен к тепловыделяющей поверхности. В испарителе жидкая фаза конденсируемого рабочего тела испаряется, и из-за индуцированного градиента давления образовавшийся пар проходит в секцию конденсатора, где рассеивает скрытую теплоту, конденсируясь в жидкость. Затем жидкий конденсат возвращается в испаритель через капиллярную структуру за счет капиллярного давления. Эти циклы переноса массы и энергии продолжают до тех пор, пока не будет достигнут верхний предел тепловыделения, т. е. критический тепловой поток паровой камеры.

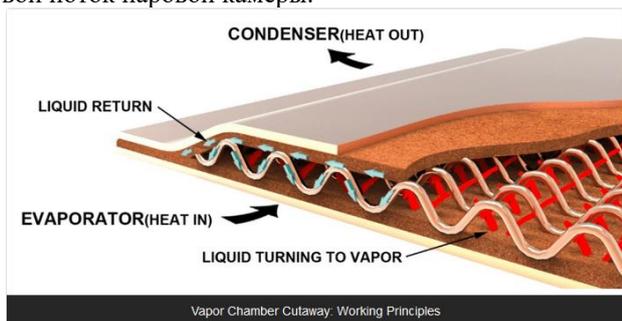


Рис.1. Схема работы современной паровой камеры, [1].

Общие тепловые характеристики паровой камеры в основном зависят от теплопередачи и/или капиллярных характеристик пористой структуры, то есть фитилей испарения и подачи жидкости. Фундаментальные основы этих процессов достаточно изучены, [2-3]. Несмотря на то, что паровые камеры существуют уже несколько десятилетий, некоторые технические проблемы, в основном связанные с ограничениями снимаемого теплового потока вследствие преждевременного высыхания жидкости в испарителе или плохой теплопередачи вследствие большого общего теплового сопротивления, еще предстоит решить в ходе дальнейших исследований. В работе выявлены основные текущие проблемы паровых камер в сравнении с другими техниками охлаждения, указаны преимущества паровой камеры и перспективы развития этой техники охлаждения.

Паровые камеры широко применяются в современных устройствах, в частности в авиационной технике, вследствие слабого влияния ориентации направления гравитации на эксплуатационные характеристики устройства. Данная отрасль техники имеет большой эксплуатационный опыт подобных устройств. Однако их применение в космической технике при микрогравитации не выявлено, в отличие от широко применяемых там тепловых трубок. Работа позволит посмотреть на паровые камеры с точки зрения расширения области их применения при охлаждении современных теплонагруженных миниатюрных устройств различного базирования и применения.

Список литературы:

1. Celsia: <http://celsiainc.com/vaporchamber-types-benefits-performance-custom-design/>
2. Основы теории теплообмена. / Кутателадзе С.С. М. Атомиздат. 1979. 416 с.
3. Kandlikar Satish Critical Heat Flux in Subcooled Flow Boiling - An Assessment of Current Understanding and Future Directions for Research. // Multiphase Science and Technology. 2001. 13. 10.1615/MultScienTechn.v13.i3-4.40

УДК 621.565

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БИОТКАНИ**Пушкарев А.В.^{1,2}, Жидков Д.А.^{1,2}**¹ Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана,
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская, 5 к.1² Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования,
125993, Россия, ул. Баррикадная, д. 2/1, стр. 1

Локальное низкотемпературное воздействие на биоткани (ЛНВ) сопровождается отводом теплоты от биообъекта и, соответственно, снижением его температуры. ЛНВ можно разделить на направления: (1) «разрушение», например, криохирurgia, (2) «сохранение», например, криоконсервация и гипотермия, (3) «терапия», например, в части физиотерапии суставов. Получение различных эффектов зависит от глубины и скорости охлаждения целевой области биоткани. В направлениях «разрушение» и «сохранение» часто имеет место растянутый фазовый переход воды, находящейся в свободном и связанном состоянии в клетках и в межклеточном пространстве.

Развитие данного метода ограничено несовершенством планирования. В условиях необходимости поддержания высоких скоростей охлаждения, низкой теплопроводности биотканей, теплопритоков от окружающих биотканей и кровотока, индивидуальных особенностей пациентов или биологических материалов и сложности контроля воздействия в режиме реального времени необходимы специальные подходы к планированию воздействий с необходимой высокой точностью. Для их создания необходимы исследования особенностей процессов теплообмена при ЛНВ на объекты охлаждения сложной внутренней структуры со строгими ограничениями по динамике изменения температурных полей.

Концептуально, идея повышения точности ЛНВ содержит следующие элементы. Во-первых, это разделение процесса на три этапа: планирование, обеспечение воздействия под контролем, анализ результатов. Во-вторых, это выявление особенностей и критериев, влияющих на выполнение, каждого этапа. В-третьих, это поиск путей повышения точности выполнения каждого этапа. Перспективный путь лежит как в создании экспериментально верифицированных математических моделей, так и в проведении специально-подготовленных экспериментов, нацеленных на выявление особенностей процесса, которые повышают точность планирования. Проведены исследования по следующим направлениям: (1) учет особенностей динамики изотерм при фазовом переходе биологических тканей [1], (2) повышение точности малоинвазивной криоабляции предстательной железы [2]; (3) применение сапфировых криоинструментов [3]; (4) децеллюляризация.

Предложен подход по фиксации температурных полей, полученных в итоге криовоздействия, который учитывает особенности замораживаемого объекта и конструкции криоинструмента.

Решена частная задача повышения точности планирования малоинвазивной криоабляции предстательной железы в условиях ЛНВ несколькими криозондами вблизи критически важной области – около

уретрального канала, внутри которого размещена система нагрева и циркулирует физраствор при 38 °С.

Проведены испытания криоинструментов, материалы: медь, латунь и искусственный сапфир, который перспективен для как для проведения воздействия (благодаря высокой теплопроводности), так и для контроля зоны замораживания оптическими методами. Показано преимущество применения сапфировых аппликаторов в скорости и глубине замораживания, потенциальной возможности оптического контроля. Проведено моделирование данной задачи в среде Ansys. Получены сравнительные характеристики роста области замораживания, которые возможно использовать на этапе планирования.

В рамках исследования процессов децеллюляризации биотканей (сохранения каркаса биоткани при удалении слоя клеток донора) рассмотрены процессы циклического замораживания и оттаивания образцов (перикарда животного происхождения) при варьировании числа циклов прохождения фазового перехода и интенсивности как замораживания, так и оттаивания. Замораживание образцов в специальных контейнерах проводилось погружением в жидкий азот с температурой -196 °С, размораживание помещением в фосфатно-солевой раствор с температурой 37 °С в жидкостном термостате Termex BT10 (Termex, Томск, РФ). Предварительно получены положительные результаты, показывающие возможность применения физического фактора без применения химических средств. Показано, что большое значение оказывает начальное влагосодержание ткани, от которого зависит образование кристаллов льда и которое необходимо контролировать для сохранения механических свойств. В дальнейшем необходимо провести исследования с привлечением образцов других типов.

Потенциально количественный рост результатов исследований в данном направлении способен преобразовать ЛНВ к прецизионному его выполнению.

Список литературы:

1. Burkov I.A., Pushkarev A.V., Ryabikin S.S., Shakurov A.V., Tsiganov D.I., Zherdev A.A. Numerical simulation of controlled precision cryosurgery using argon Joule Thomson and liquid nitrogen evaporation cryoprobes. // Int. J. of Refrigeration. 2022. V.133. p. 30-40.
2. A study of prostate multiprobe cryoablation near urethra for precision treatment planning. Pushkarev, A.V., Ryabikin, S.S., Saakyan, N.Y., Burkov, I.A., Vasilev, A.O. Cryobiology. 2022. 109, p.10–19.
3. Comparison of Probe Materials for Tissue Cryoablation: Operational Properties of Metal and Sapphire Cryoprobes Pushkarev, A.V., Ryabikin, S.S., Tsiganov, D.I., Kurlov, V.N., Dolganova, I.N. Journal of Biomedical Photonics and Engineering. 2022. 8(4). 040501.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда (проект № 21-19-00676)*

УДК 544.351.3

ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ СИСТЕМЫ «ОКТАДЕКАН-ПРОПАН/БУТАН»

Салихов И.З., Хабриев И.Ш., Хайрутдинов В.Ф., Ахметзянов Т.Р., Абдулагатов И.М.

¹ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 420015, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 68
 2 Институт Проблем Геотермии и Возобновляемой Энергетики - Филиал ОИВТ РАН, 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. И. Шамиля, д. 39

Важным разделом термодинамики являются представления о фазовых равновесиях в различных по составу системах. А одной из ключевых характеристик фазовых равновесий является такое понятие, как растворимость вещества и, в том числе, в СКФ средах. Знания о фазовых равновесиях в системах, находящихся в СКФ состоянии, необходимы для понимания таких процессов, как СКФ экстракция, сушка по СКФ траектории, СКФ импрегнация, СКФ диспергирование, реакции в СКФ средах, СКФ хроматография, которые и являются одной из фундаментальных основ инновационного технологического направления, именуемого СКФ технологиями.

Данные по экспериментальным и теоретическим исследованиям фазовых равновесий многокомпонентных углеводородных смесей при высоких температурах и высоких давлениях имеют множество практических приложений. Например, в нефтяных пластах обычно встречаются многокомпонентные смеси легких и тяжелых алканов. Поэтому достоверная информация о фазовых равновесиях этих смесей важна прежде всего для моделирования термодинамических условий нефтяных пластов, снижения затрат на перепроектирования, достижения более эффективной оптимизации сетей нефтепроводов и технологического оборудования.

Смеси сверхкритических флюидов и тяжелых углеводородов демонстрируют сложное фазовое поведение в процессе добычи нефти, что требует надежных данных по равновесию. Следовательно, фазовое поведение основных компонентов тяжелой нефти в сверхкритических условиях является ключевым исходным материалом для разработки технологии увеличения нефтеотдачи.

Перспективными растворителями для нефтехимической промышленности являются n-алканы и, в том числе пропан, бутан и их смеси. Одним из немаловажных преимуществ этих веществ является относительно низкие значения критических параметров, особенно давление.

В рамках данной работы исследовано фазовое равновесие системы «октадекан-пропан/бутан» (0,433 мольных долей пропана + 0,567 н-бутана) на трех выбранных изотермах 403,15 К, 423,15 К и 443,15 К в диапазоне давлений от 0,9 до 7,1 МПа с использованием оптической ячейки высокого давления (рис. 1). Суммарная расширенная неопределенность измерений температуры, давления и концентрации при доверительной вероятности 95 % с коэффициентом охвата $k = 2$ оценивается в 0,15 К, 0,05 % и 3 % соответственно.

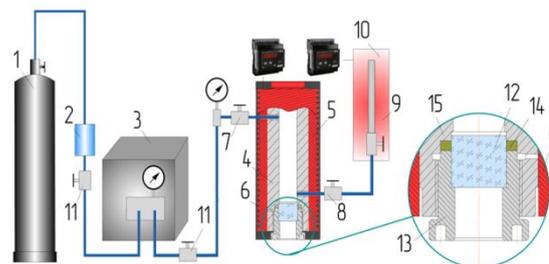


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования фазового равновесия бинарных систем с использованием оптической ячейки высокого давления: 1 – баллон; 2 – фильтр-осушитель; 3 – насос; 4 – оптическая ячейка высокого давления; 5 – медная рубашка; 6 – термоизоляция; 7 – вентиль для отбора верхней (газовой) фазы; 8 – вентиль для отбора нижней (жидкой) фазы; 9 – проботборник; 10 – термостатирующая ванна; 11 – вентиль; 12 – сапфировое окно; 13 – крышка ячейки; 14 – кольцо уплотнительное; 15 – корпус ячейки.

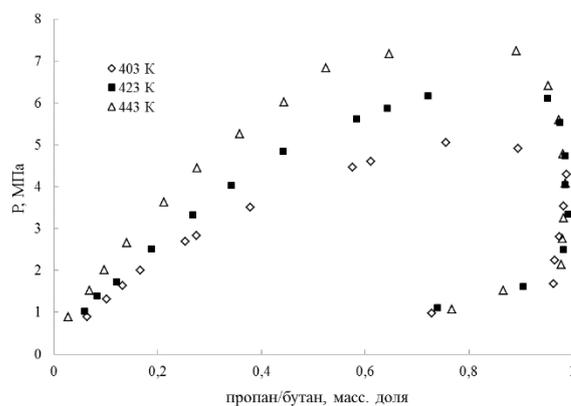


Рис. 2. Фазовое равновесие «октадекан-пропан/бутан»

Фазовое равновесие данной системы также принадлежит к фазовому поведению первого типа (классификация D.F.Williams). Характеристики фазового равновесия «жидкость – пар» для данных систем по факту представлены лишь бинодальями, в итоге формирующими некую непрерывную критическую кривую. Такое фазовое поведение объясняется сильной взаимной растворимостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00 (Сверхкритические флюидные технологии в переработке полимеров (FZSG-2023-0007))

УДК 536.248.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ЛОКАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА, ЭВОЛЮЦИЮ И СТРУКТУРУ МИКРОСЛОЯ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

Сердюков В.С.^{1,2}, Малахов И.П.¹, Суртаев А.С.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Одним из явлений, имеющим место на микро-масштабе при кипении жидкости, является образование и дальнейшее испарение под паровым пузырем слоя жидкости, называемого в литературе «микрослоем» вследствие малой толщины. Однако, несмотря на достаточно большое количество работ, посвященных экспериментальному и численному исследованию особенностей эволюции и структуры микрослоя, сегодня ряд вопросов остается открытым. Одним из таких вопросов является влияние измерения параметров системы, в частности, давления на интенсивность испарения и эволюцию и структуру микрослоя.

В настоящей работе было проведено экспериментальное исследование эволюции нестационарного температурного поля при кипении насыщенного этилового спирта в условиях большого объема при варьировании давления в диапазоне 12 – 101.3 кПа. Эксперименты были выполнены с использованием установки и специальной конструкции тепловыделяющей поверхности на основе ИТО нагревателя, подробное описание которых представлено в [1]. Опытные данные были получены с использованием термографической съемки с высокими временным (1500 к/с) и пространственным разрешениями (250 мкм/пикс), что позволило на их основе восстановить поле распределения теплового и провести исследование влияния давления на интенсивность локального теплообмена в окрестности контактной линии под паровыми пузырями.

Анализ полученных результатов показывает, что с понижением давления максимальная плотность теплового потока, отводимого за счет испарения микрослоя заметно снижается (рис. 1).

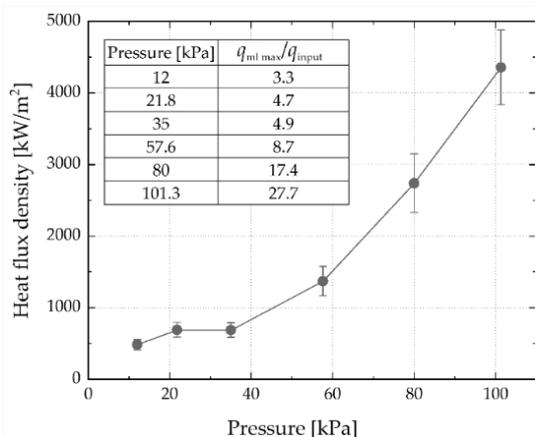


Рис. 1. Зависимость максимального теплового потока, отводимого за счет испарения микрослоя при кипении этилового спирта, от давления ($q_{input} = 150 \text{ кВт/м}^2$).

Так, отношение данной величины ($q_{ml\ max}$) к входной мощности тепловыделения понижается с 27,7 раз ($q_{ml\ max} \approx 4360 \text{ кВт/м}^2$) при кипении в условиях атмосферного давления до 3,3 раз ($q_{ml\ max} \approx 484 \text{ кВт/м}^2$) при давлении 12 кПа. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии понижения давления на полное время испарения микрослоя, что связано с увеличением времени жизни парового пузыря на стенке при понижении давления. В частности, для атмосферного давления время полного испарения микрослоя не превышает 6 мс. В свою очередь, при уменьшении давления до 12 кПа данная величина возрастает до более чем 26 мс. Подробнее результаты работы представлены в [1].

Также в работе был использован метод LED-интерферометрии [2] для определения профиля и толщины микрослоя при кипении жидкости. На рис. 2 представлен кадр роста парового пузыря при кипении воды ($p_s = 101,3 \text{ кПа}$), на котором в области испарения микрослоя отчетливо видны интерференционные кольца.

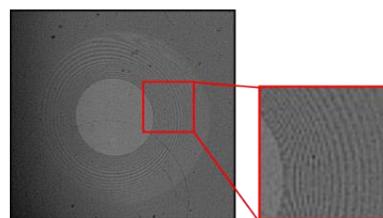


Рис. 2. Полученный с помощью LED интерферометрии кадр роста парового пузыря при кипении воды ($p_s = 101,3 \text{ кПа}$, $q_{input} = 60 \text{ кВт/м}^2$).

Полученные в настоящей работе результаты дают новую информацию об особенностях локального теплообмена в области тройной контактной линии, а также эволюции и структуры микрослоя при кипении жидкости при варьировании давления. С их использованием становится возможным более глубоко выявить взаимосвязь между характеристиками локального теплообмена и интегральной интенсивностью теплоотдачи при кипении, что, как надеются авторы, позволит создать более обобщенные модели теплообмена, учитывающие в т.ч. влияние давления в системе.

Список литературы:

1. Serdyukov V., Malakhov I., Surtaev A. The influence of pressure on local heat transfer rate under the vapor bubbles during pool boiling // Energies. 2023. V. 16. № 9. Paper № 3918.
2. Kossolapov A., Phillips B., Buccì M. Can LED lights replace lasers for detailed investigations of boiling phenomena? // Int. J. Multiph. Flow. 2021. V. 135. Paper № 103522.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда (проект № 22-79-00174)

УДК 536.248.2:532.5.013.12:681.12

ЗАКРУЧЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПАРОВОМ КАНАЛЕ КОРОТКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Серяков А.В., Конькин А.В., Алексеев Анд.П.

ООО РУДЕТРАНССЕРВИС,

173003, Россия, Великий Новгород, ул. Санкт Петербургская, 64

Повышение коэффициента теплопередачи коротких линейных тепловых труб (ТТ) — это сложная научная и технологическая задача, несколько вариантов различных способов ее решения были рассмотрены ранее [1-2]. Закручивание парового потока в выполненном в виде сопла Лавалья паровом канале ТТ длиной 100 мм и диаметром 20 мм, при больших температурных напорах на испаритель, приводит к интенсификации конденсации пара на плоской поверхности верхней крышки ТТ, и увеличению коэффициента теплопередачи $K_{ТТ}$.

Закручивание струйного потока пара над плоским испарителем создается наклонными инжекторными каналами диаметром 1 мм, с углом наклона φ в диапазоне $0^\circ < \varphi < 60^\circ$. Инжекторные каналы выполнены на диаметре критического сечения сопла парового канала, пронизывают всю толщину испарителя 3,5 мм, и их продольные оси наклонены под углом φ° к продольной оси ТТ в тангенциальном направлении. В результате их работы получается частично закрученное струйное течение пара с помощью инжекторных паровых струй над плоским испарителем под заданным углом φ° .

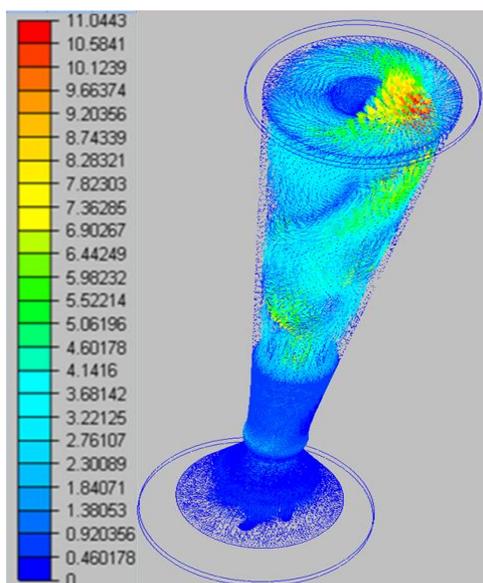


Рис. 1. Струйное течение пара над наклонными инжекторными каналами в плоском испарителе ТТ с выполненным в виде сопла Лавалья паровым каналом.

Проведенные численные расчеты с помощью программы ANSYS коэффициента гидравлического со-

противления ξ_φ выполненного в виде сопла Лавалья парового канала ТТ, с плоскими крышками и наклонным инжектированием пара капиллярными каналами, показали следующее. Расчетные значения коэффициента гидравлического сопротивления $\xi_{ТТ}$ при течении в паровом канале в диапазоне углов закрутки $0^\circ \leq \varphi < 28^\circ$ близки к величине ξ_0 при прямом струйном течении пара в пределе 2%. Начиная с угла закрутки $\varphi = 30^\circ$ начинается резкий рост $\xi_{ТТ}$.

Был создан набор тождественных ТТ с одинаковой массой заправки диэтиловым эфиром, с испарителями, оснащенными инжекторными каналами с различным углом наклона $\varphi,^\circ$ и проведены сопоставления их коэффициентов теплопередачи. Коэффициент теплопередачи $K_{ТТ}$ измеряли обычным образом с помощью вакуумного адиабатического калориметра, совмещенного с вихревым проточным калориметром [1]. На рисунке 2 приведены результаты измерений.

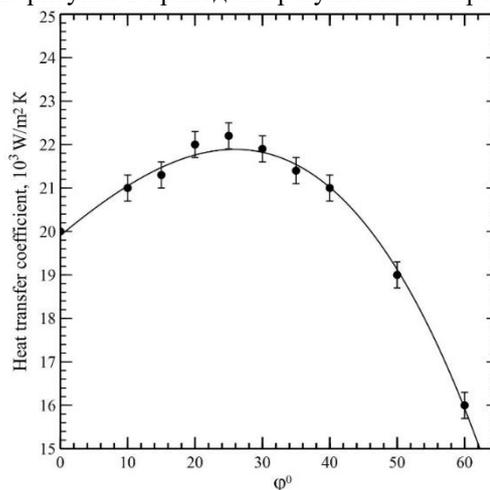


Рис. 2. Опытные значения коэффициентов теплопередачи $K_{ТТ}$ при различных углах закрутки φ° при температурном напоре на испаритель $\delta T = T_{ev} - T_B = 20 \text{ K}$.

Максимум $K_{ТТ}$ определен нами при угле закрутки потока пара $\varphi = 26^\circ \pm 2^\circ$.

Список литературы:

1. Seryakov A.V. Computer modeling of the vapour vortex orientation changes in the short low-temperature heat pipes // International Journal of Heat and Mass Transfer 2019, v.140, pp.243-259.
2. Seryakov A.V. Resonant vibration heat transfer coefficient increase of short low-temperature heat pipes // International Journal of Heat and Mass Transfer 2020. v. 158. pp. 1-22.

УДК 536.242

ЭВОЛЮЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КАПЛИ ЖИДКОСТИ ПРИ ИСПАРЕНИИ С БИОМЕТЕТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**Смирнов Н.И.^{1,2}, Старинская Е.М.^{1,2}, Миськив Н.Б.^{1,2}, Старинский С.В.^{1,2}**¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Исследование влияния внешнего электрического поля на капли жидкости является актуальным и важным направлением в науке и технологии. Это связано с тем, что электрические поля могут оказывать значительное воздействие на свойства и поведение жидкостей [1].

Во-первых, электрические поля могут влиять на поверхностное натяжение капель жидкости. Это может привести к изменению их формы и размера, а также к возникновению дополнительных сил внутри капель, в том числе капиллярных. Изучение этих эффектов может привести к разработке новых методов управления формой и размером капель, что может быть полезным для различных приложений, включая микрофлюидику и микроэлектромеханические системы.

Во-вторых, электрические поля могут влиять на процессы перемещения капель жидкости, например, на их скорость и направление движения. Это может быть использовано для создания новых методов микронасосов и микрожидкостных систем, а также для разработки новых методов доставки лекарственных препаратов и диагностики на микроуровне.

В-третьих, электрические поля могут влиять на процессы испарения капель жидкости, что имеет важное значение для различных процессов, например, в фармацевтике, биотехнологии и химической промышленности. Изучение этих эффектов может привести к разработке новых методов управления процессами испарения и конденсации капель, а также к созданию новых методов контроля за свойствами и состоянием жидкостей.

Исследование процесса испарения капель на биомететических поверхностях также является актуальной и важной задачей в науке и технологии. Это связано с тем, что такие поверхности имеют особые свойства смачивания, которые могут влиять на процессы испарения капель и использоваться в различных технологиях [2]. Как пример, в настоящей работе использовались бифильные поверхности – сложно структурированные поверхности, имеющие резкий пространственный переход между участками с контрастными свойствами смачиваемости [3, 4].

Бифильные поверхности имеют разные свойства на разных участках, что может приводить к неоднородному распределению тепла и массы при испарении капли. Это может быть использовано для создания новых методов управления процессом испарения капель, например, для увеличения или уменьшения скорости испарения в зависимости от нужд конкретного приложения.

Также, бифильные поверхности могут быть использованы для создания новых методов конденсации

и сбора капель, например, в технологии дистилляции. Изучение процесса испарения на таких поверхностях может привести к созданию новых методов управления конденсацией и осаждения коллоидных систем.

Для проведения экспериментов был создан экспериментальный стенд (см. рис. 1) на основе плоского конденсатора, регулируемого высоковольтного источника Мантигора ТН-10000 (0-10 кВ), геометрия капель фиксировалась при помощи высокоскоростной видеокамеры Phantom VEO710 (макс. 1 млн Гц). В экспериментах использовались супергидрофобная и бифильная поверхность. А также различные жидкости: дистиллированная вода, коллоидные растворы благородных металлов.

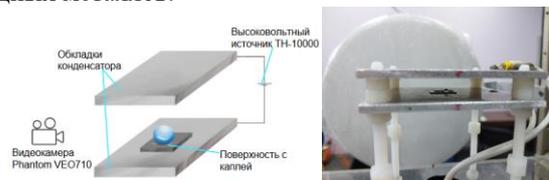


Рис. 1. Схема и фото экспериментального стенда.

В электрическом поле наблюдали изменение геометрии капли во времени (вытягивание вверх). Также при больших напряженностях электрического поля наблюдался отрыв капли с посадочного места. Был зафиксирован электрический пробой через каплю (см. рис. 2).

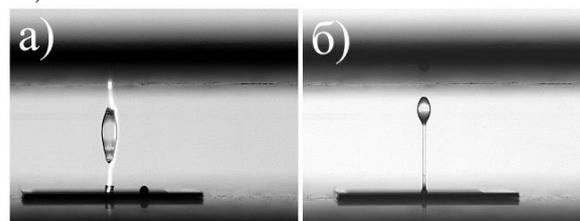


Рис. 2. а) – электрический пробой через каплю (напряженность 10 кВ/см), б) – отрыв капли с посадочного места (напряженность 9 кВ/см).

Список литературы:

1. Almohammadi H., Amirfazli A., Sessile drop evaporation under an electric field, *Colloids Surfaces. // A Physicochem. Eng. Asp.* 2018. 555. 580–585.
2. B.B. Wang, X.D. Wang, Y.Y. Duan, M. Chen, Molecular dynamics simulation on evaporation of water and aqueous droplets in the presence of electric field. // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2014. 73. 533-541.
3. W. Qi, P.B. Weisensee, Dynamic wetting and heat transfer during droplet impact on bi-phobic wettability-patterned surfaces. // *Phys. Fluids.* 2020. 32.
4. S.V. Starinskiy, E.M. Starinskaya, Spreading of Impacting Water Droplet on Surface with Fixed Microstructure and Different Wetting from Superhydrophilicity to Superhydrophobicity. // *Water.* 2023. 15. 719.

УДК 536.248.2

ПРИМЕНЕНИЕ БИФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОБМЕНОМ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Суртаев А.С.^{1,2}, Kosar A.³, Сердюков В.С.^{1,2}, Малахов И.П.^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет,

630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

³Sabancı University,

34956, Turkey, Istanbul, Üniversite Caddesi, 27

Кипение широко используется в различных технологиях и отраслях промышленности, включая тепловую и атомную энергетику, металлургию, термическое опреснение, а также в различных системах термостабилизации силовой и микроэлектроники [1]. Давление является ключевым режимным параметром процесса кипения и оказывает комплексное влияние на теплообмен и развитие кризисных явлений. В частности, известно, что снижение давления оказывает негативный эффект на интенсивность теплообмена и величину критического теплового потока при кипении жидкости. В докладе будут представлены результаты по управлению характеристиками смачивания поверхности для интенсификации теплообмена при кипении при различных давлениях.

Для создания бифильных поверхностей использовался двухкомпонентный коллоидный раствор NeverWet Rust-Oleum. В рамках исследований было создано несколько конфигураций бифильных поверхностей, включая поверхность с однородным гидрофобным покрытием. Эксперименты были проведены с использованием экспериментальной установки, подробно описанной в работе [2], при кипении насыщенной воды при давлениях в диапазоне 8-103 кПа. Для анализа эволюции паровых пузырей использовалась высокоскоростная видеокамера Phantom VEO410. Для измерения температурного поля нагревателя использовалась высокоскоростная ИК-сканер FLIR Titanium HD 570 M с частотой кадров 1000 кадров в секунду.

На основе данных, полученных с использованием высокоскоростной визуализации процесса кипения (см. рис. 1), проведен анализ частот отрыва паровых пузырей для отдельных центров зародышеобразования и гидрофобных участках бифильной поверхности, а также величин отрывных диаметров пузырей (Dotr) для поверхностей с различной конфигурацией. В частности, показано, что использование гидрофобной и бифильной поверхностей приводит к заметному уменьшению величины отрывных диаметров пузырей в области давлений $p \leq 70$ кПа по сравнению с данными, полученными на гидрофильной поверхности. Более того, продемонстрировано, что зависимость частоты отрыва паровых пузырей от давления на гидрофобной и бифильной поверхностях имеет принципиально иной тренд по сравнению с гидрофильной поверхностью.

С помощью ИК-термографии были построены кривые кипения для бифильной и гидрофобной поверхностей и проведено их сравнение с данными, по-

лученными для необработанной поверхности. Показано, что использование бифильных поверхностей позволяет существенно снизить интегральную температуру поверхности и увеличить интенсивность теплообмена при кипении воды более чем в 3 раза по сравнению с гидрофильной необработанной поверхностью. Более того, если на немодифицированной поверхности наблюдается четкий тренд снижения коэффициента теплоотдачи с уменьшением давления, то для бифильной и гидрофобной поверхностей кривые кипения для различных давлений практически совпадают друг с другом.

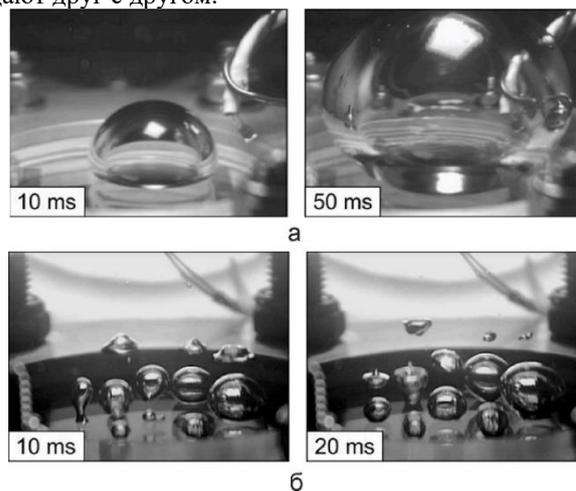


Рис. 1. Визуализация кипения воды на гладкой гидрофильной поверхности (а) и бифильной поверхности (б) при давлении 10 кПа.

Таким образом, результаты исследований демонстрируют перспективность использования бифильных поверхностей для интенсификации и стабилизации процесса кипения при субатмосферных давлениях. Более того, выводы, сделанные на основе анализа результатов опытов, полезны для разработки оптимальных конфигураций поверхностей с гетерогенными характеристиками смачивания для использования при различных давлениях.

Список литературы:

1. Mudawar I. Recent advances in high-flux, two-phase thermal management // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. 2013. vol. 5. №. 2.
2. Serdyukov V. et al. Biphilic surface to improve and stabilize pool boiling in a vacuum // Appl. Thermal Engineering. 2022. P.118298.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и ТУБИ-ТАК в рамках научного проекта № 20-58-46008

УДК 536.42

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ВОДЫ С НАГРЕТОЙ ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКИ

Саломатов В.В.¹, Сыродой С.В.², Кузнецов Г.В.²

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Томский политехнический университет, 630050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

В настоящее время в мировой научной периодике опубликовано крайне мало работ с результатами систематических экспериментальных и теоретических исследований процессов растекания и испарения капель охлаждающих жидкостей с поверхностей типичных для деталей энергонасыщенного оборудования материалов (медь, нержавеющая сталь, алюминий, латунь, кремний и др. [1]). Трудность прогностического моделирования охлаждения поверхностей энергонасыщенного оборудования каплями жидкости заключается в кривизне ее поверхности (обусловленной силами поверхностного натяжения) и испарении со смещением границы раздела «капля – внешняя среда». При разработке математических моделей движение границы раздела «капля – внешняя среда» вследствие ее испарения часто не учитывается (например, в [2]). Разработанные к настоящему времени математические модели испарения капель жидкости с нагретых поверхностей и методы решения соответствующих задач тепломассопереноса [3] не являются автономными и базируются на апостериорной информации. В этой связи цель настоящей работы – разработка математической модели испарения капли жидкости с нагретой поверхности в условиях движения поверхности испарения (изменения размеров капли).

На рис. 1 приведена область решения двумерной осесимметричной задачи сопряженного теплопереноса в испаряющейся с поверхности нагретой металлической подложки капле воды и тепломассопереноса паров воды в окрестности капли. Размеры области, в которой происходит диффузия паров, выбирались в десять раз больше радиуса капли, исходя из известных экспериментальных данных [4]. За начало системы координат принята точка пересечения оси симметрии капли с поверхностью подложки

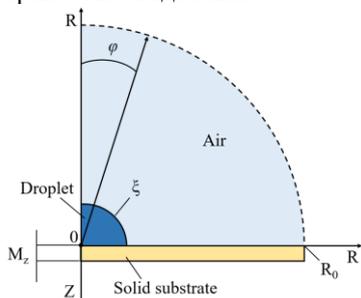


Рис. 1. Область решения.

При разработке математической модели принято, что весь комплекс процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно в системе «подложка - капля жидкости – воздух» описывается системой уравнений в частных производных. При постановке задачи приняты четыре основных допущения:

- 1) В начальный момент времени капля представляет собой полусферу;
- 2) В течение всего периода испарения форма капли изоморфна полусфере ($id(C)$);
- 3) Принята плоская (2D) постановка задачи.
- 4) Эффекты Марангони в капле не учитываются

На рисунке 2 приведены зависимости теоретических и экспериментальных значений времен испарения капли жидкости с нагреваемой поверхности. Первое, что можно отметить – существенно нелинейный характер зависимостей $t(T_s)$, которые имеют экспоненциальный. При этом значения времен монотонно убывают с увеличением температуры нагрева. Это обусловлено существенным влиянием комплекса процессов тепло и массопереноса, протекающих при существенных фазовых трансформациях.

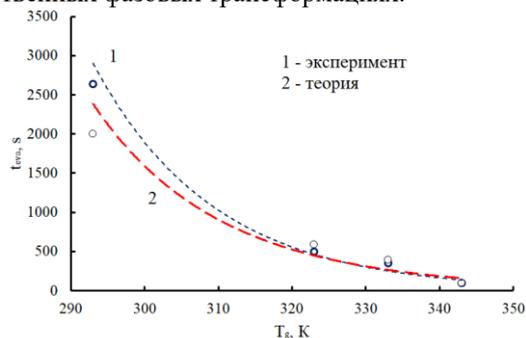


Рис. 2. Зависимость времен испарения капли жидкости с нагреваемой подложки.

Также, проведенный энергетический анализ процессов испарения капли жидкости с подложки показал, что в начальный период нагрева большая часть теплового потока, поступающего от нагретой подложки, расходуется на накопление тепла в капле за счет теплоемкости. После нагрева капли процесс испарения интенсифицируется, а процесс охлаждения выходит на наиболее оптимальный тепловой режим (испарительный).

Список литературы:

1. Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging / X.T.Tong.; Springer, New York, 2011
2. Al-Sharafi A., Yilbas B.S., Ali H., Droplet heat transfer on micro-post arrays: Effect of droplet size on droplet thermal characteristics, // Int. J. Heat Fluid Flow. 2017. V. 68. p. 62 - 78
3. Zubkov V.S., Cossali G.E., Tonini S., Rybdylova O., Crua C., Heikal M., Sazhin S.S., Mathematical modelling of heating and evaporation of a spheroidal droplet. // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. V.108 p.2181–2190.
4. Prakash J., Sikarwar B.S. Modeling of Sessile Droplet Evaporation on Engineered Surfaces. // J. Therm. Sci. Eng. Appl. 2019. V. 11.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект 18-79-10015-П

УДК 536.246

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ В ПОТОК СУХОГО ВОЗДУХА ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Сюзаев А.И.¹, Горбачев М.В.¹, Макаров М.С.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Процесс фазового перехода жидкость-пар является базовым процессом во многих отраслях промышленности и технике: теплообменные аппараты, радиаторы, тепловые трубки, градирни. Для интенсификации процесса теплообмена в последние годы всё чаще обращаются к модифицированным капиллярно-пористым поверхностям, обеспечивающим пассивный подвод рабочей жидкости к теплообменной поверхности, имеют низкое термическое сопротивление и обеспечивают теплообмен за счёт фазового перехода [1-3]. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования по испарению дистиллированной воды известной температуры с модифицированной капиллярно-пористой поверхности титана и кремния в конвективный поток сухого воздуха повышенной температуры.

По результатам экспериментов можно сделать вывод, что процесс испарения дистиллированной воды с модифицированных пластин при повышенных температурах набегающего потока происходит в несколько этапов: интенсивное испарение, равновесный процесс испарения, финальное испарение. Полученные результаты позволяют предположить, что в финальный

момент времени процесса испарения жидкости с капиллярно-пористой поверхности существует точка, когда эффективность охлаждения достигает своего максимума благодаря испарению микро-слоя плёнки жидкости, находящейся внутри структуры. В дальнейшем, будет ставиться задача прогнозирования и повторяемости данного эффекта с целью максимизировать процесс охлаждения за счёт фазового перехода жидкость-пар и сделать данный эффект стабильным.

Список литературы:

1. Wenbin Zhou, Xuegong Hu, Yu He, Yingying Yu, Lan Mao / Study on axial wetting length and evaporating heat transfer in rectangular microgrooves with superhydrophilic nano-textured surfaces for two-phase heat transfer devices. *Energy Conversion and Management*. 2019. V. 200. 112098.
2. Chen Feng, Sanjeev Chandra / Evaporation of ethanol films wicking on structured, porous coatings deposited on copper plates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Volume 136. Pages 821-831.
3. Jinchun Tang, Xuegong Hu / Evaluation of capillary wetting performance of micro-nano hybrid structures for open microgrooves heat sink. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2020. Volume 112. 109948.

УДК 539.234, 539.213, 538.95

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ АМОРФНОГО ГАЗОНАСЫЩЕННОГО ЛЬДА, ПОЛУЧЕННОГО ОСАЖДЕНИЕМ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ НА ХОЛОДНУЮ ПОДЛОЖКУ

Томин А.С., Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Коверда В.П.

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

При низкотемпературной конденсации разреженных потоков водяного пара и газа возможно формирование газонасыщенного аморфного льда, способное захватывать молекулы газа при кристаллизации с образованием газового гидрата. Газовый гидрат (ГГ) – это клатратное нестехиометрическое соединение, кристаллический каркас которого образован молекулами воды, а его полости заполнены молекулами газа. На 1 молекулу газа в таком соединении может приходиться менее 6 молекул воды, а при разложении единичного объема гидрата выделяется порядка 150 объемов газа. Большая вместимость газа при умеренных термобарических условиях и достаточно простое его извлечение открывают возможности для создания новой технологии хранения и транспортировки газов, а существование на Земле огромных залежей гидратов природного горючего газа позволяет рассматривать их в качестве потенциального источника энергии. Исследование свойств ГГ, условий получения и границ устойчивости актуально для разработки перспективных газогидратных технологий.

В данной работе аморфный газонасыщенный лед получали осаждением встречных разреженных потоков водяного пара и газа в вакууме на охлаждаемую жидким азотом подложку. При осаждении водяного пара под углом к подложке возможно формирование пористого аморфного льда [1] способного к большому газонасыщению. Нагревание газонасыщенного аморфного льда приводит к расстекловыванию и последующей спонтанной кристаллизации. Лавинообразное зарождение центров кристаллизации в условиях глубокой метастабильности обеспечивает захват молекул газа без их вытеснения движением фронта кристаллизации и образование ГГ.

Для наблюдения за образцом применен емкостный датчик, закрепленный на подложке и позволяющий определять температуры стеклования и кристаллизации по изменению диэлектрических свойств образца при нагревании. Измерение температуры образца осуществляется медь-константановой термопарой, тепловые эффекты регистрируются методом ДТА. Темпера-

тура на поверхности датчика при конденсации аморфного слоя не превышает 80 К. Вакуум в камере при осаждении не хуже 10^{-5} мм.рт.ст.

В работе определены температуры стеклования и кристаллизации образцов различного газосодержания. Показано, что увеличение газосодержания образца повышает температуру его кристаллизации. Максимальное газосодержание получаемых ГГ может зависеть от условий получения аморфного образца. Результаты предыдущих работ [2] показывают, что осаждение сверхзвуковых потоков позволяет получить более высокое газосодержание по сравнению с дозвуковым осаждением. Предварительные опыты с осаждением встречных потоков так же свидетельствуют о возможности получения высокого газосодержания.

Результаты исследования показывают успешность применения метода неравновесной конденсации молекулярных потоков разреженного пара и газа для получения ГГ. В перспективе метод может быть использован для получения гидрата водорода для решения проблемы его хранения и транспорта в газогидратном состоянии в связи с развитием водородной энергетики.

Список литературы:

1. Greg A. Kimmel, K. P. Stevenson, Z. Dohnálek, R. Scott Smith, Bruce D. Kay. Control of amorphous solid water morphology using molecular beams. I. Experimental results // J. Chem. Phys. 2001. V. 114. P. 5284-5294
2. Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Томин А.С., Коверда В.П. Исследование процессов конденсации и кристаллизации при образовании газовых гидратов в сверхзвуковых струях // ТВТ. 2019. Т. 57. № 5. С. 769–776
3. Faizullin M.Z., Vinogradov A.V., Tomin A.S., Koverda V.P. Kinetics of decay of highly non-equilibrium metastable states of gas-saturated amorphous ice in the presence of artificially introduced crystal centers // Int. J. Heat Mass Trans. 2019. V. 143. P. 118592.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-29-00116,
<https://rscf.ru/project/23-29-00116/>*

УДК 536.248.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Федосеев А.В., Сальников М.В., Остапченко А.Е.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Кипение является одним из наиболее эффективных механизмов отвода тепла от нагретой поверхности и широко используется в различных технических приложениях, связанных с тепло и массообменом. Для повышения эффективности теплообмена при кипении применяются различные методы модификации поверхности теплообмена, так или иначе связанные с изменением свойств смачиваемости поверхности и внесением структурных пространственных модификаций [1].

Поиск оптимальной с точки зрения интенсификации теплообмена конфигурации поверхности на основе экспериментальных исследований является достаточно трудоемкой задачей, в то время как использование стандартных методов вычислительной гидродинамики является хорошей альтернативой. В последнее время для моделирования однофазных и многофазных течений, в том числе процессов кипения, хорошо зарекомендовал себя метод решеточных уравнений Больцмана (МРУБ) [2-4]. В работах [3,4] с помощью МРУБ исследовались процессы кипения на гладкой бифильной поверхности (лиофобные зоны на лиофильной поверхности). Были получены кривые кипения и определена оптимальная конфигурация поверхности с контрастной смачиваемостью.

Целью данной работы является исследование процессов кипения на пространственно структурированной поверхности с однородной (нейтральной) смачиваемостью. Для этого в МРУБ поверхность нагревателя задавалась в виде ступенек (каверн) одинаковой ширины и высоты, но с различным пространственным разрешением, $h = 0, 80, 200$ мкм, 400 мкм. На рис. 1. представлена фазовая картина кипения на таких поверхностях при прочих равных условиях.

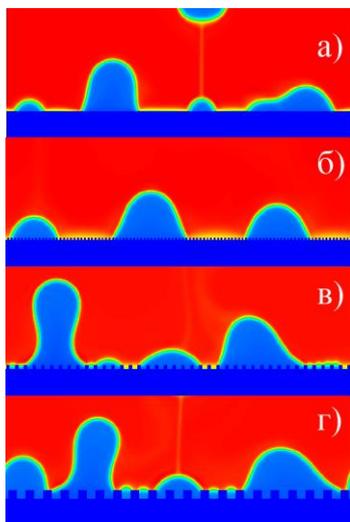


Рис. 1. Фазовые картины кипения на гладкой (а) и шероховатых поверхностях (б-г).
Размер каверн: б) 80, в) 200 мкм, г) 400 мкм.

В результате моделирования были получены кривые кипения (зависимости отводимого от поверхности теплового потока от перегрева поверхности) на указанных структурированных поверхностях (см. Рис. 2). При небольших тепловых перегревах теплообмен происходит в режиме конвекции без образования паровой фазы. Паровая фаза образуется при меньшей тепловой нагрузке на поверхности с меньшей шероховатостью (наименьший перегрев для 80 мкм). Однако, кризис кипения на структурированных поверхностях наблюдается при меньших перегревах, чем на гладкой.

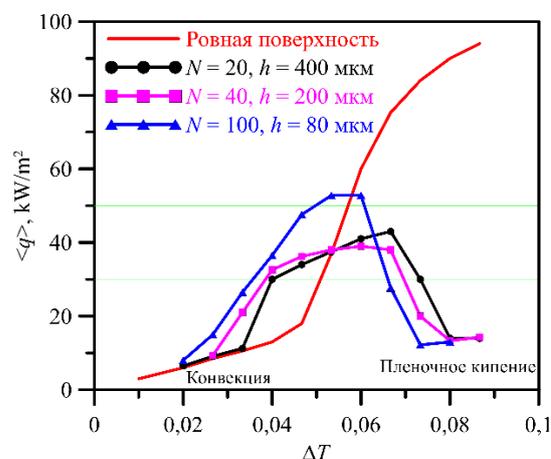


Рис. 2. Кривые кипения на ровной (сплошная линия) и шероховатых поверхностях (размер каверн: круги – 400 мкм, квадраты – 200 мкм, треугольники – 80 мкм).

В работе представлены первичные данные по моделированию процесса кипения на структурированных поверхностях МРУБ. В дальнейшем будут проведены расчеты для различных пространственных структур на теплообменной поверхности, на основе которых будут предложены оптимальные параметры структуризации теплообменной поверхности.

Список литературы:

1. Liang G., Mudawar I., Review of pool boiling enhancement by surface modification // Int. J. Heat. Mass Transf. 2019. V. 128. P. 892–933.
2. Kupershtokh A., Medvedev D., Karpov D., On equations of state in a lattice Boltzmann method // Comput. Math. Appl. 2009. V. 58. №5. P. 965.
3. Федосеев А. В. и др. Моделирование динамики всплытия одиночного пузыря методом решёточных уравнений Больцмана // СибЖИМ. 2023. Т. 26, № 1. С. 191-200.
4. Fedoseev A. V., et. al., Lattice Boltzmann Simulation of Optimal Biphilic Surface Configuration to Enhance Boiling Heat Transfer // Energies. 2022. V. 15. 21. P. 8204.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-01251)

УДК 536.242

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ СМЕСИ ПРОПАН/ИЗОБУТАН В МИКРОКАНАЛАХ

Шамирзаев А.С., Кузнецов В.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В связи с концепцией замещения хладагентов на озонобезопасные всё большее применение в качестве экологических хладагентов находят углеводороды и их смеси. Как указано в [1] одним из наиболее перспективных углеводородных хладагентов является пропан (R290). Исследование теплообмена при кипении чистых и смесевых хладагентов в канале 9,43 мм показало, что использование смеси пропан/изобутан позволяет увеличить критическое паросодержание и получать более высокие коэффициенты теплоотдачи в области высоких паросодержаний, по сравнению с чистыми хладагентами [2]. В то же время теплообмен и критические явления при кипении смесевых хладагентов в микроканалах исследовано недостаточно. Целью данной работы является экспериментальное исследование теплообмена при кипении смеси пропан/изобутан в щелевом микроканальном теплообменнике в условиях вынужденной конвекции в диапазоне параметров, практически важном для развития систем охлаждения микроэлектроники.

Эксперименты проведены на теплообменнике, изготовленном из медного блока марки М1 с вмонтированными нагревателями на верхней части которого фрезерованы 2 микроканала сечением 2x0,3 мм закрытые крышкой из нержавеющей стали 12Х18Н10 толщиной 2 мм. Эксперименты выполнены при массовых скоростях 370, 600 и 900 кг/м²с при абсолютном давлении в системе 8 бар. Подробное описание экспериментальной установки представлено в работе [3]. В качестве рабочей жидкости использована зеотропная смесь пропан/изобутан при массовой концентрации исходной смеси 57%-43%.

Экспериментально получены кривые кипения при подаче на вход в теплообменник однофазного потока недогретого до температуры насыщения на 1-2 градуса. Определена зависимость средних коэффициентов теплоотдачи от теплового потока и паросодержания. Обнаружено, что при тепловых потоках до 80 кВт/м², коэффициенты теплоотдачи хорошо соответствуют расчёту по модели из [4], они слабо зависят от массовой скорости и сильно от теплового потока, доминирующим механизмом теплообмена является кипение. С увеличением теплового потока коэффициенты теплоотдачи перестают увеличиваться с ростом теплового потока, что указывает на подавление кипения. В то же время не наблюдается ухудшения теплоотдачи вплоть до достижения критического теплового потока. Не азеотропная смесь в микроканалах подавляет развитие сухих областей, так же, как и в «обычных» каналах.

Получены данные по критическим тепловым потокам. Экспериментальная зависимость критического

теплового потока от массовой скорости в исследованных условиях представлена на рис.2

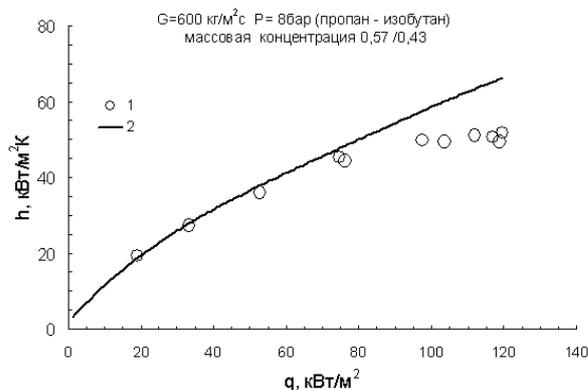


Рис. 1. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи при испарении бинарной смеси пропан/изобутан в системе микроканалов при массовой скорости 600 кг/м²с. Точки 1- эксперимент, линия 2 –расчёт по [4].

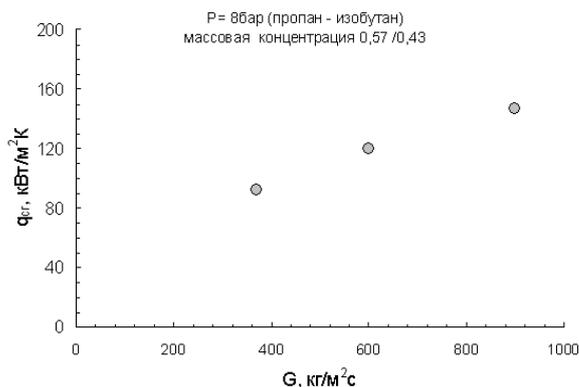


Рис. 2. Зависимость критического теплового потока от массовой скорости при кипении смеси пропан/изобутан в системе микроканалов.

Список литературы:

1. Yadav S., Liu J., Kim S. C. A comprehensive study on 21st-century refrigerants-R290 and R1234yf: A review // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Т. 182. С. 121947.
2. Oliveira G. H. S. et al. Flow boiling of hydrocarbons and their zeotropic binary mixtures under pre-and post-dryout conditions // Applied Thermal Engineering. 2021. Т. 198. С. 117483.
3. Kuznetsov V.V., Shamirzaev A.S. The influence of the mass flow rate on the critical heat flux during subcooled deionized water boiling in a microchannel cooling system // Technical Physics Letters. 2018. Т. 44. №. 10. С. 938-941.
4. Zou X. et al. Experimental study on saturated flow boiling heat transfer of R170/R290 mixtures in a horizontal tube // International Journal of Refrigeration. 2010. Т. 33. №. 2. С. 371-380.

Работа выполнена при поддержке государственного бюджета. Номер регистрации проекта 121031800215-4

УДК 536.248.2

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ В ТОНКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Швецов Д.А.¹, Павленко А.Н.¹, Жуков В.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Глобальной проблемой теплофизики является поиск новых методов интенсификации теплообмена и обеспечения устойчивой и безопасной работы теплообменного оборудования. Кипение и испарение – это наиболее эффективные способы отвода тепла от теплоотдающей поверхности. Задачи увеличения коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока при кипении являются чрезвычайно важными.

Диэлектрические жидкости в настоящее время нашли широкое применение в современной микроэлектронике. Это обусловлено тем, что диэлектрические жидкости имеют низкие температуры насыщения (~ 30–65 °С), а допустимая температура нагрева теплогенерирующих элементов микроэлектроники составляет ~ 80–85 °С. В связи с этим исследование теплообмена при кипении диэлектрических жидкостей является крайне актуальным. Изучение характерных переходов от теплообмена при кипении в тонких горизонтальных слоях жидкости к теплообмену при кипении в условиях большого объема представляет собой особенно важную задачу для проектирования будущих высокоэффективных систем охлаждения. Краткий обзор исследований по теплообмену при кипении в горизонтальных слоях различных жидкостей представлен в работе авторов доклада [1].

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования теплообмена в горизонтальных слоях различной толщины диэлектрической жидкости HFE–7100 при различных давлениях на гладкой поверхности (шероховатость $R_z = 3,2$ мкм). Перед началом экспериментов на дно рабочей камеры наливали определенное количество рабочей жидкости, необходимое для создания слоя нужной высоты. Подробное описание экспериментального стенда и методики измерения приведено в работе [2].

В ходе экспериментов реализовывался ряд стационарных режимов теплообмена, при которых регистрировались температуры по толщине обогреваемой стенки и давление над слоем жидкости в объеме. На рис. 1 представлена зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока, полученная в слое HFE–7100 толщиной 10 мм при давлении 1 атм. Измерения режимных параметров теплообмена проводились одновременно с визуальными наблюдениями (см. рис. 2). Также в экспериментах измерялись критические тепловые потоки при различных давлениях и высотах слоя рабочей жидкости.

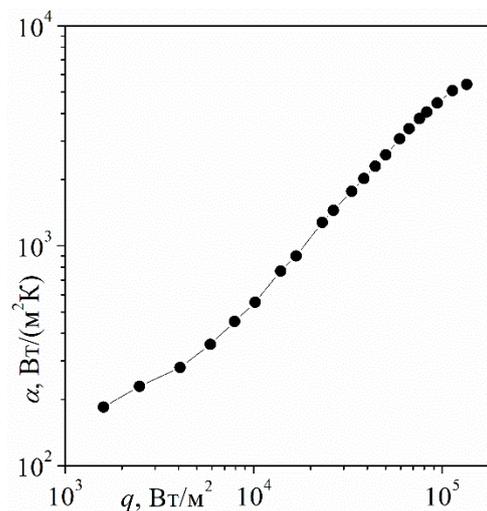


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока, полученная в слое HFE–7100 высотой 10 мм при давлении 1 атм.



Рис. 2. Пузырьковое кипение в слое HFE–7100 высотой 10 мм при давлении 1 атм. Плотность теплового потока $q = 23,1$ кВт/м², температурный напор $T_w - T_s = 18$ К.

Список литературы:

1. Павленко А.Н., Жуков В.И., Швецов Д.А. Кризисные явления и интенсификация теплообмена при кипении и испарении в горизонтальных пленках жидкости (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 11. С. 81-97. DOI 10.56304/S0040363622110078.
2. Zhukov V.I., Pavlenko A.N. Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 117. P. 978–990. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.060.

*Исследование выполнено за счет средств гранта
Российского научного фонда (проект № 23-19-00245)*

УДК 536.42

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ В МИКРОПОРАХ

Шебелев А.В.^{1,2}, Лобасов А.С.^{1,2}, Зайцев Д.В.¹, Кабов О.А.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, д. 79

Численное исследование кипения в микропорах является актуальной и важной темой в области теплообмена и теплофизики. Микропористые материалы обладают уникальными свойствами, делая их привлекательными в разнообразных областях, например, охлаждение электронных компонентов или в создании теплообменников. Изучение кипения в микропорах представляет собой сложную задачу из-за многообразия физических явлений, влияющих на процесс.

Метод VOF является одним из наиболее распространенных и эффективных численных методов для моделирования многофазных потоков, таких как кипение. Он позволяет точно определить границы между фазами и учитывать их взаимодействие, что делает его подходящим для исследования кипения в микропорах.

Для моделирования поверхностного натяжения в данной задаче используется CSF (непрерывная поверхностная сила) алгоритм, предполагающий введение в уравнения движения дополнительной объемной силы F_s , величина которой определяется из соотношения:

$$F_s = \sigma k \nabla F,$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, k – кривизна свободной поверхности, которая определяется как дивергенция вектора нормали:

$$k = \nabla \cdot \left(\frac{n}{|n|} \right).$$

Нормаль к свободной поверхности вычисляется, в свою очередь, как градиент объемной доли жидкой фазы в ячейке:

$$n = \nabla F.$$

Процесс массопереноса реализован с помощью модели Lee.

Тестирование методики проведено на задаче кипения на плоской пластине.

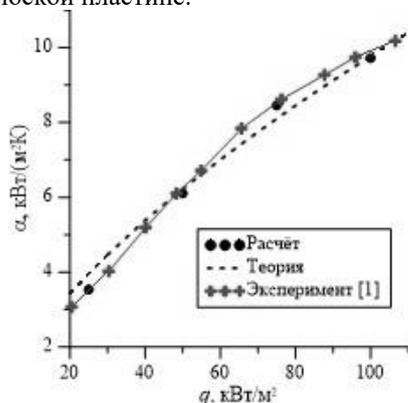


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи при кипении от плотности теплового потока на нагревателе.

Сравнение результатов моделирования с экспериментом [1] и теорией представлено на рисунке 1. Как видно из этого рисунка, предложенная методика дает хорошее совпадение как с экспериментальными, так и теоретическими данными.

Далее, используя предложенную методику, были проведены расчеты в микропорах. На рисунке 2 показана геометрическая модель пористой структуры с подложкой и нагревателем.

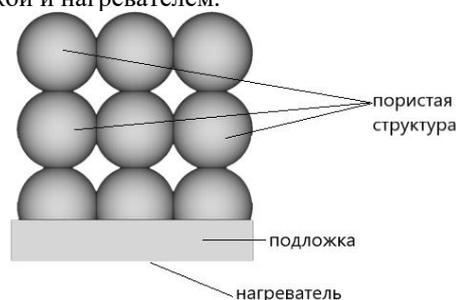


Рис. 2. Геометрия пор, вид сбоку.

Расчеты проведены в трехмерной постановке. Диаметр шаров 150 микрон, при этом заходят друг в друга на 10 микрон, образуя тем самым периодическую пористую структуру. Рабочее тело – вода, с постоянными теплофизическими свойствами. На верхней границе расчетной области задавалось постоянное давление ($P=0$). На нагревателе задавалась постоянная температура ($T=383K$). Подложка и поры медные, с соответствующими теплофизическими свойствами. На всех стенках заданы условия прилипания для всех фаз. Краевой угол смачивания выбран равным 160° . Построена полиэдральная сетка с минимальным шагом 5 микрон и общим количеством ячеек 2,7 млн. В начальный момент времени область заполнена водой с температурой 373 К. Для корректного разрешения границы раздела вода-пар и численной стабильности расчета число Куранта было принято 1, CFL=1.

В результате расчетов получены картины течения, распределения температур, фаз и показан процесс образования пузырьков пара.

Список литературы:

1. Pastuszko R., Wójcik T.M. Experimental investigations and a simplified model for pool boiling on micro-fins with sintered perforated foil // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015. V. 6. P. 34–44.
2. Hyounghoon Lee, Chirag R. Kharangate, Nikhin Mascarenhas, Ilchung Park, Issam Mudawar. Experimental and computational investigation of vertical downflow condensation // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. V. 55. P. 865-879.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-49-08018

УДК 621.9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ХЛАДОНА R113 В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ МЕТОДОМ VOF

Яньков Г.Г.^{1,2}, Минко К.Б.², Артемов В.И.², Серёжкин Л.Н.¹, Лошкарёва Е.А.¹

¹ Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,
248023, Россия, Калуга, ул. Степана Разина, 26

² ФГБОУ ВО “НИУ “МЭИ”,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Для проектирования теплообменного оборудования перспективных теплоутилизационных комплексов требуется получение надежных данных о коэффициентах теплоотдачи при конденсации хладагентов в трубах. Метод Volume Of Fluid (VOF) [1], дополненный моделями и алгоритмами для расчета фазовых переходов, позволяет получать детальную информацию о процессах конденсации внутри труб. В предыдущих работах [2, 3] авторы выполнили моделирование конденсации хладон в вертикальных [2] и горизонтальных трубах [3]. Сравнение с экспериментальными данными и существующими расчетными соотношениями показало эффективность метода VOF для предсказания распределения основных локальных характеристик потока при конденсации хладон.

В настоящей работе представлены данные о конденсации хладона R113 в наклонной трубе 38x3 мм длиной 3 м. Размеры трубы соответствуют размерам рабочего участка стенда ЗАО “НПВП “Турбокон” [4], на котором предполагается проведение серии экспериментальных исследований. Рассмотрены режимы конденсации R113 при давлении 3,3 атм, массовой скорости до 180 кг/(м²с) и угле наклона 20°. На внутренней стенке канала используются граничные условия третьего рода. Коэффициент теплопередачи от внутренней стенки трубы к охлаждающей воде рассчитывается из предположения о том, что коэффициент теплоотдачи к воде равен 2500 Вт/(м²К). Температура воды постоянна по длине канала и равна 28,5 °С. Для моделирования используется алгоритм VOF, реализованный в авторском CFD-код ANES [5]. Источники массы и теплоты за счет фазового перехода рассчитываются с помощью модифицированной в [6] модели Lee [7]. Турбулентная вязкость определяется по $k-\omega$ SST-модели Ментера [8].

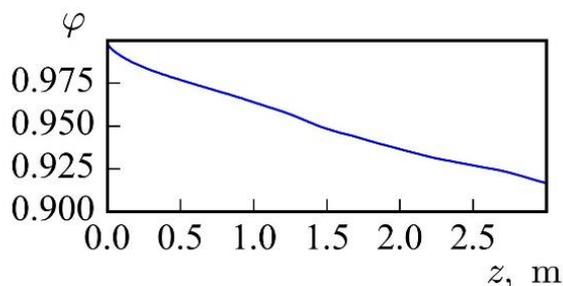


Рис. 1. Распределение истинного объемного паросодержания по длине канала при конденсации R113, $p = 0.33$ МПа, массовая скорость 180 кг/(м²с).

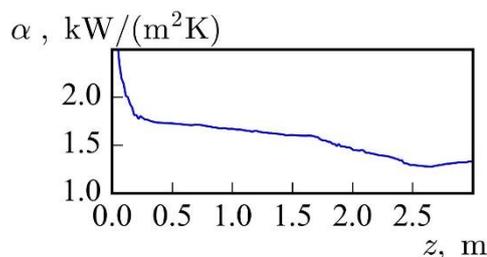


Рис. 2. Распределение коэффициента теплоотдачи по длине канала при конденсации R113, $p = 0.33$ МПа, массовая скорость 180 кг/(м²с).

На рис. 1, 2 представлены изменения истинного объемного паросодержания и коэффициента теплоотдачи по длине канала.

В докладе обсуждаются распределения локальных характеристик теплообмена по периметру наклонной трубы, проводится сопоставление с доступными в литературе данными.

Список литературы:

1. Hirt C.W. Nichols B. Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys. 1981. V. 39. Is. 1. P. 201–225.
2. Моделирование процессов конденсации хладон в вертикальных трубах методом VOF / Минко К.Б., Артемов В.И., Яньков Г.Г., Птахин А.В. // Теплоэнергетика. 2023 г. №7. (в печати)
3. Моделирование процессов конденсации хладон R113 в горизонтальной трубе методом VOF/ Яньков Г.Г., Мильман О.О., Минко К.Б., Артемов В.И. // Теплоэнергетика. (в печати)
4. Железнов А.П. Стенд для исследования процессов кипения и конденсации хладагента // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 17-22 октября 2022 г.): в 2 т. Т.1 М.: Издательство МЭИ, 2022. 440 с. (с. 308-311)
5. Код ANES. [Электрон. ресурс.] <http://anes.ch12655.tmweb.ru/>
6. Минко К.Б., Артемов В.И., Клементьев А.А. Моделирование методом VOF процессов конденсации неподвижного и движущегося насыщенного пара на поверхности горизонтальной трубы // Теплоэнергетика. 2023 г. №3. С. 20-39.
7. Lee W.H. A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling / Multiphase transport: fundamentals, reactor safety, applications / Ed. by T.N. Veziroglu. Washington, DC: Hemisphere Publishing, 1980. P. 407–432.
8. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. V. 32 P.1598–1605.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(грант № 22-19-00495,
<https://rscf.ru/project/22-19-00495/>)

СЕКЦИЯ 6

Процессы переноса при физико-химических превращениях, включая горение

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ МЕТАНА ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА ВОЗМУЩЕНИЙ

Агафонцев М.В.¹, Луценко А.В.^{1, 2}, Лобода Е.Л.^{1, 2}, Рейно В.В.²

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1

В настоящее время проведено множество исследований, посвященных изучению процессов, протекающих при горении метановоздушных смесей, однако процессам взаимодействия факела пламени с малыми пульсациями давления не уделялось большого внимания. Поскольку метан обладает высокой теплотой сгорания и относительно низкой стоимостью, применение метана широко распространено в различных отраслях промышленности. На практике значительный интерес представляет горение метана в воздушном потоке, которое реализуется в диффузионном режиме [1, 2]. В этом режиме скорость горения ограничивается неравномерным распределением компонентов топливной смеси на выходе из сопловой части нагревательного устройства. В настоящее время актуальным остается проведение расчетных и экспериментальных исследований различных способов воздействия на факел пламени, способствующих к интенсификации смешения и горения метана с воздухом. К основным видам таких воздействий можно отнести пульсации давления в виде звуковых колебаний, а также электромагнитное поле.

Воздействие акустических колебаний на факел пламени приводит к пульсации скорости и температуры в зоне горения [3 - 7], что приводит к интенсификации смешения топлива с окислителем. Кроме того, влияние акустических колебаний приводит к изменению диапазонов устойчивого горения воздушно-метановой смеси. В большинстве работ, посвященных влиянию акустических колебаний на горение метана, топливная смесь рассматривается как предварительно перемешанная [8, 9]. В связи с этим является актуальным проведение расчетно-экспериментальных исследований по определению влияния пульсаций скорости воздушного потока, вызванных акустическим воздействием, на структуру диффузионного пламени при струйном горении метана. Одним из способов численного описания процессов горения является численное решение системы уравнений Навье-Стокса для реагирующего многокомпонентного газа в нестационарной постановке. При численном решении системы уравнений Навье-Стокса важно установить связь между турбулентным потоком и процессом горения. Следует отметить, что все математические модели требуют подтверждения экспериментальными данными.

В данной работе, на основе математической модели, проведено численное исследование диффузионного горения метана (CH₄) при наличии внешних пульсаций давления малой амплитуды. Решалась си-

стема уравнений Рейнольдса (модель RANS), стандартные уравнения для моделирования турбулентных течений (k-ε модель). Для описания процесса горения была использована модель Магнуссена (EDM). Флуктуации давления задавались с помощью функции, определяемой пользователем (UDF). С помощью программного комплекса Ansys Fluent [10] проанализированы поля температуры, скорости и других характеристик потока в присутствии внутренних пульсаций давления. В результате анализа полученных данных были получены качественные оценки влияния пульсаций давления на факел пламени. Показано, что влияние акустических колебаний на факел пламени приводит к появлению в спектре пульсаций температуры характерной частоты, соответствующей частоте внешних пульсаций давления.

Список литературы:

1. Simulation, Experiments, Pollutant Formation. / 4th Edition. Springer, 2006, 390 p.
2. Annushkin Yu.M. Basic rules governing the burning of turbulent jets of hydrogen in air channels. // Combust. Explos. Shock Waves. 1981. V.17, Iss. 4. pp 400–411. DOI: 10.1007/BF00761209.
3. Suvorov D.V., Kocheva M.A. Mechanisms of electromagnetic energy effect on the flame. // Modern Science-Intensive Technologies. 2014. № 5-1. pp. 182–184.
4. Trevisan B.P., Dourado W.M.C. Experimental investigation of the acoustic flame interactions in a Bunsen burner. // Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais. 2013. pp. 1–3.
5. Agafontsev M.V., Loboda E.L., Klimentev A.S., Reyno V.V. The effect of pressure pulsation on diffusion combustion. // Proceedings of SPIE. 2021. V. 11916. P. 1–5. DOI: 10.1117/12.2603896
6. Bourebla A., Baillet F. Appearance and stability of a laminar conical premixed flame subjected to an acoustic perturbation. // Combust. Flame. 1998. V.114, Iss. 3-4. pp. 303–318. DOI: 10.1016/S0010-2180(97)00323-4.
7. Loboda E.L., Agafontsev M.V., Reyno V.V., Klimentiev A.S. Studying the effect of low-amplitude pressure fluctuations on the field of temperatures in flame using thermography. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2018. V.10833. P. 1–5. DOI: 10.1117/12.2504423.
8. Luciano E., Ballester J. Analysis of the dynamic response of premixed flames through chemiluminescence cross-correlation maps. // Combust. Flame. 2018. V.194. pp. 296–308. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.05.005.
9. Zhang Z., Zhao D., Dobriyal R., Zheng Y., and Yang W. Theoretical and experimental investigation of thermoacoustics transfer function. // Applied Energy. Vol. 154. 2015. pp. 131–42.
10. ANSYS Fluent User's Guide. / Release 15.0. Canonsburg, 2013. URL:<http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelos-grad/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Гранта Президента РФ № МК-2078.2022.1.1*

УДК 621.793:533.9

ВЛИЯНИЕ ХИМ.СОСТАВА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА НА ПРОЦЕНТНЫЙ СОСТАВ СИНТЕЗ-ГАЗА ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ОТХОДОВ**Алексеев С.В., Аньшаков А.С., Домаров П.В., Фалеев В.А.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Работа посвящена переработке полиэтиленовых отходов в плазменном газификаторе с целью определить возможность получения качественного синтез-газа. Численное моделирование проводилось с использованием программы термодинамических расчётов «АСТРА-4». Для расчётов в качестве плазмообразующего газа использовались: воздух, углекислый газ (CO_2) и водяной пар (H_2O). Для полиэтилена использовалась формула C_2H_4 . Эксперименты проводились на плазменной установке [1]. Устройство плазмотронов и плазмохимические процессы в плазменных реакторах описаны в работах [2, 3],

Расчёты показали, что при использовании углекислого газа в качестве плазмообразующего, максимальное количество водорода (H_2) образуется при температуре 1700 К и составляет 17,185 моль H_2 /кг рабочего тела (РТ), а CO при этой температуре составляет 34,434 моль CO /кг РТ. Это означает, что при обработке 1 кг C_2H_4 стехиометрическим количеством углекислого газа при температуре 1700 К выделяется 1,595 nm^3 водорода и 3,195 nm^3 CO . Другие компоненты (CO_2 , CH_4 , H_2O и т.д.) содержатся в синтез-газе в количестве менее 0,1 моль/кг РТ.

При использовании паров H_2O в качестве плазмообразующего газа, максимальное количество водорода образуется при 1800 К и составляет 62,354 моль H_2 /кг РТ, а количество CO при этой температуре составляет 31,179 моль CO /кг РТ. Это означает, что при обработке 1 кг полиэтилена стехиометрическим количеством водяной плазмы при температуре 1800 К выделяется 3,195 nm^3 водорода и 1,596 nm^3 CO . Другие компоненты (CO_2 , CH_4 , H_2O и т.д.) содержатся в синтез-газе в количестве менее 0,01 моль/кг РТ.

Если плазмообразующий газ – воздух, то при 2000 К расчётные продукты газификации содержат: H_2 – 11,493 моль/кг РТ; CO – 11,328 моль/кг РТ; N_2 – 22,24 моль/кг РТ; CO_2 – 0,11 моль/кг РТ; H_2O – 0,49 моль/кг РТ. Это означает, что при обработке 1 кг полиэтилена воздушной плазмой при температуре 2000 К вырабатывается: H_2 – 1,528 nm^3 ; CO – 1,5 nm^3 ; CO_2 – 0,014 nm^3 ; H_2O – 0,065 nm^3 .

Проведённые расчёты позволяют прогнозировать состав синтез-газа при газификации промышленных и бытовых полиэтиленовых отходов. Позволяют корректировать процесс газификации, добавляя в газификатор H_2O или CO_2 .

При проведении экспериментов на установке, описанной в работе [1], в газификатор подавался гранулированный полиэтилен, а в качестве плазмообразующего газа использовался воздух в количестве, необходимом для стехиометрии количества кислорода с количеством полиэтилена.

В результате экспериментов были получены графики зависимости процентного содержания водорода,

оксида углерода, диоксида углерода, кислорода от времени. Вместе с графиками получена таблица, в которой при заданной температуре представлены численные значения перечисленных величин.

Газоанализатор ТЕСТ 203 зафиксировал показания: CO – (17 – 14,7)%об; H_2 – (14,3 – 12,7)%об; CO_2 – (7,2–8,2)%об.; CH_4 – (7,7 – 6,1)%об.; O_2 – (0,6)%об. Этот газоанализатор ТЕСТ – 203 имеет не селективный датчик определения процентного содержания отдельных углеводородов, поэтому в числовые значения CH_4 входят числовые значения других C_xH_y .

В работе [4] при газификации полиэтилена авторы использовали газовый хроматограф Agilent 7890А и дополнительно обнаружили предельные и непредельные углеводороды: C_2H_2 – (2-3)%об; C_2H_4 -(0,2 – 0,4)%об; C_3H_6 – 23 мг/м³; C_6H_8 – 637 мг/м³; C_7H_8 – (16 – 60) мг/м³; ароматические углеводороды: бензол и т.д.

В работе [5] проведено численное моделирование процесса газификации полиэтилена с использованием детальных кинетических механизмов (ДКМ). Показана зависимость выхода процесса газификации на режим от времени

Выводы

Причиной не полной газификации полиэтилена может быть: 1) не выполнение условий стехиометрии; 2) не достигается требуемый уровень температуры; 3) при заданной температуре не выдерживается необходимое время для прохождения всех реакций.

При использовании CO_2 в качестве плазмообразующего газа объём CO в продуктах газификации почти в два раза больше, чем при воздушной газификации, а при использовании H_2O объём водорода почти в 2 раза больше, чем объём CO .

Список литературы:

1. Алексеев С.В., Аньшаков А.С., Домаров П.В., Фалеев В.А. Экспериментальная плазменная установка для газификации органических отходов с дискретной подачей их в газификатор // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 6. С. 991-995.
2. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.
3. Красовская Л.И., Моссэ А.Л. Плазмохимические процессы в трехструйных электродуговых реакторах. Минск: ИТМО НАН Б, 2000. 196 с.
4. Леончик А.И., Савчин В.В., Долголенко Г.В., Сабиров Н.М., Шабуня С. И. Сравнение комбинированной термолитно-плазменной газификации органических материалов в паровой, углекислотной и смешанных средах. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
5. Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Андержанов Э.К., Медведев С.П., Численное моделирование термической конверсии газообразных продуктов пиролиза полиэтилена. // Химическая физика, 2021, том 40, №8 с.56 – 62.

УДК 533.1

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАКЕЛА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ДВУХ ЛАМИНАРНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ

В.В. Козлов, Ю.А. Литвиненко, М.М. Катасонов, А.Г. Шамаков

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская 4/1

Развитие струйных течений связано с возникновением различных типов гидродинамической неустойчивости. В случае взаимодействия двух струй картина течения значительно усложняется. В тоже время, использование соударяющихся струй позволяет, например управлять скоростными параметрами результирующей струи, формировать форму факела, тем самым влиять на процесс горения. Особенность данных исследований состоит в том, что оси симметрии соударяющихся струй расположены под острым углом друг к другу, а поперечное положение сопел изменяется от полного перекрытия струй, когда оси симметрии находятся в одной плоскости, до полного расхождения струй, когда сопла разведены в поперечном направлении.

Эксперименты проводились на струйной установке в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. Установка состояла из двух идентичных цилиндрических трубок длиной 50 мм и внутренним диаметром 0,4 мм, расположенных под углом 50° между осями симметрии сопел. Расстояние между срезами сопел 7 мм. Схема установки представлена на рис.1. В качестве газа использовалась пропан/бутановая смесь в процентном соотношении 70/30. Сжиженный газ подавался из баллона через испаритель на редуктор, затем на регулятор массового расхода, после чего разделялся тройником на две трассы подводящие газ к микротрубкам. Расход газа через каждое сопло соответствовал $\frac{1}{2}$ устанавливаемого расхода на регуляторе и был равен $1,0 \times 10^{-7}$ м³/с. Учитывая диаметр сопла 400 мкм, расчетная скорость газа, истекающего через

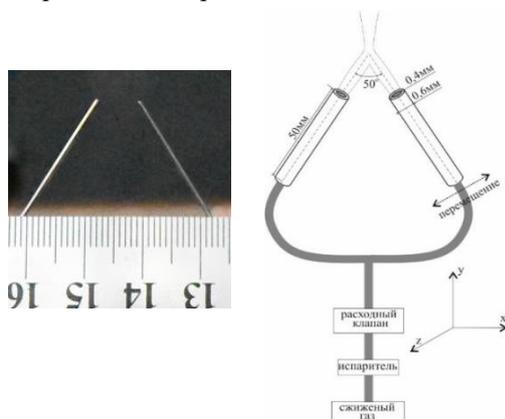


Рис. 1. Схема струйной установки.

каждое сопло $U_1 = U_2 = 0,39$ м/с, что соответствовало числу $Re_{пропан} = 42$. При данном числе Рейнольдса режим горения факела являлся ламинарным, при увеличении скорости истечения до $U \geq 0,53$ м/с ($Re \geq 55$) режим горения становился турбулентным, пламя отрывалось от среза сопел, реализовывался так называемый поднятый факел.

На рис.2 представлены теневые фотографии развития двух сталкивающихся струй газа без поджога с различной степенью перекрытия. Фото 1 и 3 рис. 2 соответствуют одному положению сопел, представлен-

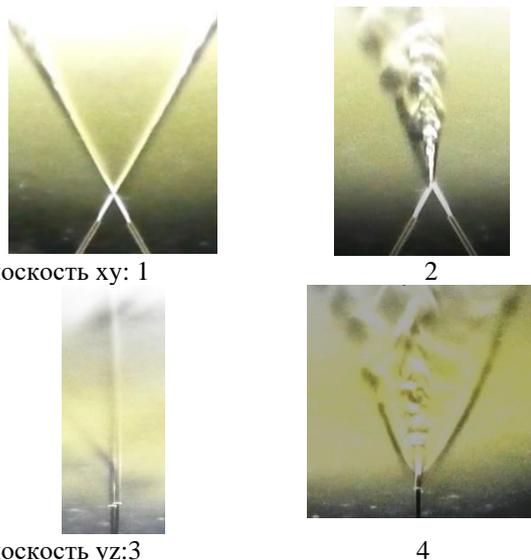


Рис. 2. Теневые фотографии сталкивающихся ламинарных газовых струй при различной степени перекрытия, 1,3 – без пересечения, 2,4 – перекрытие 100%.
 $U_1 = U_2 = 0,39$ м/с, $Re_{пропан} = 42$.

ному в плоскости $ху$ и $уз$, соответственно, при котором струи не взаимодействуют. Следующая пара фото 2 и 4 рис. 2 выполнена в тех же плоскостях при этом перекрытие струй составляет $\sim 100\%$ площади сечения каждого сопла. На рис.3 представлена изоповерхность пульсаций при 100% перекрытии струй.

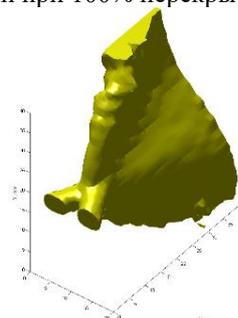


Рис. 3. Изоповерхность пульсаций средней скорости, при 100% перекрытии струй. Термоанемометрические измерения, газ-воздух.

В результате получены характерные особенности формирования результирующей струи и факела при диффузионном горении.

Подготовка статьи поддержана грантом Российского научного фонда No 22-19-00151, <https://rscf.ru/project/22-19-00151/>

УДК 534.222.2 536.46 661.215.1

ДЕТОНАЦИЯ СИСТЕМ Н₂–ВОЗДУХ С ЧАСТИЧНО ДИССОЦИИРОВАННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ**Васильев А.А.^{1,2}, Васильев В.А.¹**¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15² Новосибирский государственный университет,
630073, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Большинство химических реакций при горении и детонации протекают по цепному механизму, где особую роль в поддержании процесса играют реакции размножения активных частиц. Диффузия активных частиц из высокотемпературной зоны реакции в исходную смесь наравне с теплопроводностью считаются основными физическими механизмами, обеспечивающими возникновение и развитие химической реакции при горении. Результатом воздействия активных частиц является изменение хода химических реакций через менее энергетически затратные стадии (с индивидуальной для каждой частицы высотой потенциального барьера, меньшей эффективной энергии активации горючей системы).

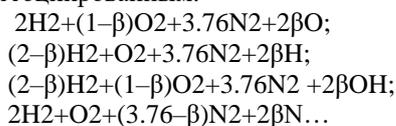
Критерием детонационной опасности горючей смеси служит критическая энергия инициирования E^* : чем меньше E^* , тем более опасна смесь. Энергия E^* может быть выражена через период индукции τ идеализированной детонационной волны (ДВ) с гладким фронтом, или через характерный размер структуры многофронтной детонации – размер ячейки a . Поскольку a , в свою очередь, также может быть выражена через τ , то корректное определение τ чрезвычайно важно для прогнозных оценок поведения горючих систем в различных условиях. В настоящее время с целью оптимизации горения и увеличения его эффективности начинают интенсивно внедряться системы из нескольких индивидуальных топливных и окислительных компонент. К таким многокомпонентным системам относятся и смеси с диссоциированными и ионизированными компонентами, а также смеси с возбужденными внутренними степенями свободы.

К сожалению, вопросы инициирования сложных систем из ионизированных, диссоциированных и недиссоциированных компонент исследованы достаточно скудно. Цель данной работы – восполнить существующий дефицит данных об условиях инициирования и параметрах детонационных волн (ДВ) на примере широко используемой при исследованиях стехиометрической водородно–воздушной смеси. Эти вопросы весьма актуальны для проблемы безопасности АЭС, где процессы диссоциации всегда реализуются при аварийных ситуациях. Следует подчеркнуть, что параметры смесей с добавками компонент с внутренне возбужденными состояниями подробно исследовались в работах под руководством профессора А.М. Старика (ЦИАМ), в которых показана их заметная роль в возникновении и протекании химических реакций.

Активные частицы (атомы Н, О, ОН, N, NO...) из зоны реакции при диффузии в исходную смесь ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3.76\text{N}_2$) меняют ее исходный состав, т.е. в

системе одновременно присутствуют недиссоциированные (молекулярные) и диссоциированные (атомарные) компоненты. Отметим, что по классическим представлениям молекулы азота считаются инертными вплоть до очень высоких температур (при $T=3000^\circ$ и нормальном давлении диссоциирована лишь 0.1% молекул), потому практически для всех топлив роль азота сводится лишь как к инертной добавке и учитывается в формуле Аррениуса для задержки воспламенения не напрямую, а косвенно – через изменение мольных концентраций $[\text{O}_2]$ и $[\text{H}_2]$ в смеси. Известно также и то, что под действием высокочастотного электрического поля азот способен превратиться в активный (возбужденный) даже при комнатной температуре, энергично взаимодействуя с атомарным кислородом и водородом. Пассивностью азота невозможно объяснить другой известный факт о том, что уже при температуре 1500° в ацетилено–воздушном пламени фиксируется радикал HCN . При детонационных температурах происходит эффективная накачка колебательных степеней свободы молекулярного азота, потому предположение о «низкотемпературном» возбуждении азота электрическим полем детонационной волны требует прямого учета N_2 при разбавлении смеси.

Расчеты выполнены с помощью компьютерной программы «БЕЗОПАСНОСТЬ», разработанной в ИГиЛ СО РАН для оценок детонационной опасности горючих систем. Начальными параметрами выбраны $P_0=10^5$ Па, $T_0=298$ К. Продукты реакции считаются химически равновесными. Проанализированы системы, когда один из компонент оказывается частично диссоциированным:



Установлено, что диссоциация части молекул водорода, либо кислорода, либо азота исходной стехиометрической водородно–воздушной смеси приводит к уменьшению критической энергии инициирования детонации E^* .

Обнаружено, что атомарный азот способен перевести водородно–воздушную систему в разряд более взрывоопасных даже по сравнению с топливно–кислородными смесями (с разницей в критических энергиях инициирования E^* на несколько порядков).

Работа выполнена в рамках бюджетного Проекта ИГиЛ СО РАН 2.3.1.2.4. «Неклассические процессы горения и детонации как основа новых фундаментальных знаний и технологий»

УДК 51-74: 536.46

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО И ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В МАЛОГАБАРИТНОЙ ТОПКЕ

Дектерев А.А.^{1,2}, Кузнецов В.А.^{1,2}, Дектерев Ар.А.^{1,2}, Тэпфер Е.С.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Сибирский федеральный университет,

660074, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

Работа посвящена численному моделированию совместного сжигания дизельного и пылеугольного топлива в малогабаритной топке. Частичная замена дизельного топлива на пылеугольное позволяет сделать экономически выгодным работу малых электростанций, что особенно актуально для энергообеспечения отдаленных районов, для которых стоит проблема доставки дизельного топлива.

Горение пылеугольного топлива организуют в крупных энергоблоках, что обосновано необходимостью достаточно длительного времени пребывания угольных частиц в топочном объеме. В малогабаритных топках угольная пыль не успевает пройти все фазы, сопутствующие горению угля: прогрев частиц; выход влаги и летучих компонент; выгорание коксового остатка.

В ИТ СО РАН отработаны ряд технологий позволяющие создать специальные горелочные устройства для факельного сжигания распыленного угля. Во-первых – это технология подготовки угля микропомола на мельницах дезинтеграторах. При такой технологии характерный размер угольных частиц составляет десятки микрон и угольные частицы проходят дополнительную механоактивацию, что сказывается на эффективности их горения [1]. Во-вторых, это технология интенсификации распыла и сжигания жидких топлив [2] с применением для распыла высокоскоростной струи перегретого пара. При таком способе сжигания жидких топлив резко сокращается зона воспламенения из-за интенсивного испарения и перемешивания топлива с окислителем. Введение частиц угля микропомола в высокотемпературную зону горения жидкого топлива (~1600°) способствует интенсивному протеканию всех процессов в угольной частице и резкому сокращению времени ее выгорания.

В работах [3] и [4] представлены результаты численного моделирования, соответственно, для сжигания угля микропомола и паросажистого горелочного устройства.

В предлагаемой работе предложена математическая модель устройства для совместного факельного сжигания дизельного и пылеугольного топлива включающая в себя комплекс взаимосвязанных физико-химических моделей, описывающих турбулентное движение газа и частиц (капли жидкого топлива и частицы угля), перенос лучистой энергии, процессы испарения и горения жидкого топлива, сушки, газификации и выгорания угольных частиц.

Выполнены расчетные исследования процессов в тангенциальном горелочном устройстве и малогабаритной топочной камере при одной тепловой нагрузке для различных сочетаний расходов топлив - дизель-

ное/пылеугольное в диапазоне 100/0 до 50/50. На рисунках 1 и 2 представлены расчетные картины распределения температуры и скорости в горелочном устройстве и топочной камере. В рассмотренных режимных вариантах наблюдается стабильное горение факела и относительно низкий, менее 5%, недожег угольного топлива, что позволяет перейти к экспериментально-лабораторному подтверждению такой схемы сжигания и в дальнейшем к проектированию специализированных горелочно-топочных устройств.

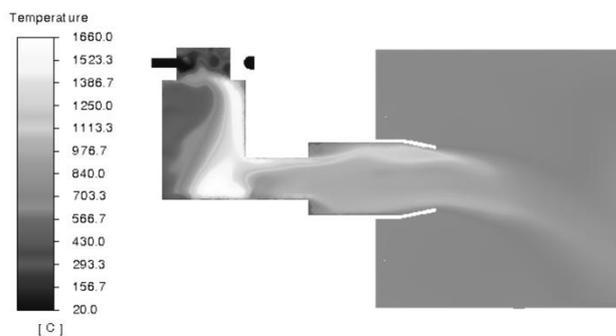


Рис.1 Распределение температуры в тангенциальном горелочном устройстве для совместного сжигания дизельного и пылеугольного топлива.

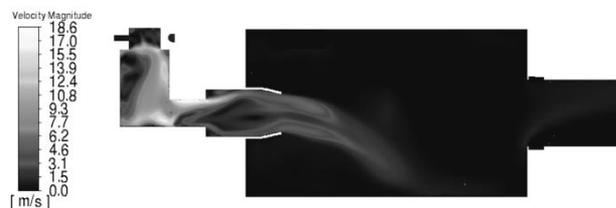


Рис.2 Магнитуда скорости в тангенциальном горелочном устройстве и топочной камере.

Список литературы:

1. Бурдуков А.П., Попов В.И., Фалеев В.А., Юсупов Т.С. Использование механоактивированных углей микропомола в энергетике. // Ползуновский вестник. 2010. № 1. с. 93-98.
2. Копьев Е.П., Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Мухина М.А. Изучение характеристик пламени горелочного устройства при распылении жидких углеводородов паровой струей // Доклады АН ВШ РФ. 2019. №2 (43). С. 38-55.
3. Бурдуков А.П., Магдеева О.Л., Кузнецов В.А., Чернецкий М.Ю. Расчетное исследование 2-х ступенчатого безмазутного горелочного устройства на основе угля микропомола. // Ползуновский вестник. 2015. №4. Т.1. с. 162-1678.
4. Minakov A.V., Kuznetsov V.A., Dekterev A.A., Anufriev I.S., Kopyev E.P., Alekseenko S.V. Comparative Analysis of Numerical Methods for Simulating N-Heptane Combustion with Steam Additive. // Energies. 2023. 16(1). 25 doi.org/10.3390/

Исследование поддержано Российским научным фондом (Проект №19-19-00443)

УДК 536.2(075)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИРОЛИТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ГЕНЕРАЦИИ ВОДОРОДА ИЗ МЕТАНА

Долгих В.Д., Кудинов В.А., Беляков Н.Р.

Самарский государственный технический университет,
443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Водород, представляющий ценное химическое сырьё, может быть использован как экологически чистое топливо. Для его промышленного получения применяются следующие способы: электролиз воды, паровая конверсия метана (химическая реакция метана с водяным паром); газификация угля (химическая реакция угля с водяным паром и кислородом – парокислородная конверсия) [1, 2]. Однако получение водорода с использованием всех перечисленных методов энергозатратно и, к тому же, при паровой конверсии метана и газификации угля побочным продуктом является углекислый газ, выбросы которого в атмосферу должны быть ограничены. Следовательно, необходимо использовать какие-то другие, экологичные и менее энергозатратные способы получения водорода. К их числу относится способ получения водорода из метана посредством его пиролиза. Нагрев метана до температуры пиролиза осуществляется в установке, использующей в качестве топлива метан или часть водорода, полученного в процессе пиролиза (расход на собственные нужды). Использование водорода в качестве топлива для нагрева метана с целью его термического разложения позволяет организовать процесс получения водорода при полном отсутствии выбросов углекислого газа в окружающую среду.

Разработана установка получения водорода путём пиролиза метана в реакторе с газовым нагревом, включающая (см. рис): 1 – реактор пиролиза метана, в котором происходит нагрев метана до температуры 600 – 1100° С (в зависимости от эффективности применяемых катализаторов) и его превращение в водород и углерод; 2 – газовая печь, служащая для нагрева реактора 1 путём факельного сжигания метана или части водорода, полученного на выходе из реактора; 3 – тепловая изоляция печи; 4 – выхлопные трубы газовой печи; 5 – горелки для сжигания метана (или водорода); 6 – краны; 7 – ёмкости хранения метана (или водорода), используемого в качестве топлива газовой печи 2; 8 – трубка подачи метана в реактор 1; 9 – трубка отбора водорода.

Произведён тепловой расчёт реактора и печи для его нагрева при определённых геометрических характеристиках и заданных исходных данных. Найдены коэффициент теплопередачи, тепловой поток суммарные тепловые потери (с уходящими газами, от химического недожога, в окружающую среду), количество теплоты на химическую реакцию и на нагрев газа, рассчитано тепловыделение в топке при различных температурах, количество теплоты, передаваемое в результате сложного теплообмена (радиацией и конвекцией), а также газодинамические параметры. Выполненные расчёты позволяют предварительно оценить

температурное состояние многослойного водородного реактора, определить режимы движения и расходы нагреваемой газовой среды, оценить коэффициент полезного действия. Полученные расчётные результаты могут быть полезны проектировщикам водородных реакторов для предварительной оценки габаритов, производительности и режимов работы.

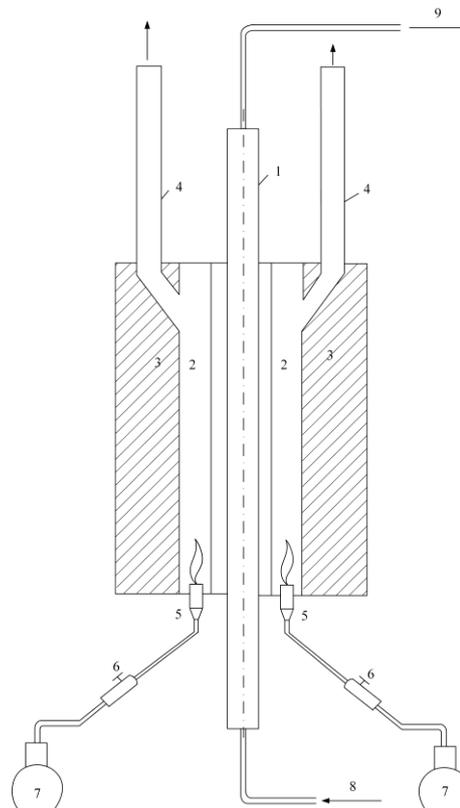


Рис. Схема установки пиролиза метана с газовым нагревом

Список литературы:

1. Пиролиз углеводородного сырья / Т.Н. Мухина, Н.Л. Барабанов, С.Е. Бабаш и др. – М.: Химия. 1987. 240 с.
2. Kudinov I.V., Pimenov A.A., Kryukov Y.A., Mikheeva G.V. A theoretical and experimental study on hydrodynamics, heat exchange and diffusion during methane pyrolysis in a layer of molten tin. International Journal of Hydrogen Energy. 2021. V.46. 10183–10190.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета

УДК 662.767

ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИМ РАЗЛОЖЕНИЕМ МЕТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАТАЛИЗАТОРА «НИКЕЛЬ НА КИЗЕЛЬГУРЕ»**Желнов Ю.В., Долгих В.Д., Иванов С.А., Виноградова М.Р., Мелешко Н.В.**Самарский государственный технический университет,
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244**ВВЕДЕНИЕ**

В мире все больше набирает популярность тренд на декарбонизацию экономики. А все возрастающая потребность в дополнительной энергии заставляет разрабатывать механизмы перехода от ископаемого топлива к экологически более безопасным энергоносителям, например, водороду. Поэтому 8 июля 2020 года Европейская комиссия опубликовала Стратегию в области водорода. Производство водорода осуществляется несколькими путями, включая паровой риформинг метана, частичное окисление углеводородов, крекинг метана, газификацию угля и электролиз воды. Однако в большинстве этих процессов происходит выброс CO/CO_2 , что усиливает парниковый эффект.

В данной работе для получения водорода в процессе пиролиза метана используется промышленный катализатор «никель на кизельгуре». Катализатор представляет собой основной карбонат никеля на кизельгуре с добавкой графита. Выпускается в неактивной (невосстановленной) форме, в виде зеленых таблеток цилиндрической формы. Диаметр таблеток 4 мм, высота 6 мм. Массовая доля никеля не менее 45%. Обычно никель на кизельгуре применяется в нефтехимической и химической промышленности для гидрирования примесей ацетиленовых соединений в изопрене и бутадиене-1,3, примесей карбонильных соединений в бутаноле и других непредельных углеводородов; в сероочистке углеводородных и газовых потоков, без включения графита - в производстве душистых веществ, а также в пищевой промышленности для гидрирования растительных масел, животных жиров и жирных кислот - после того, как пройдет активацию (восстановление) при температуре 390-410°C в присутствии водорода. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование каталитической активности никеля на кизельгуре в процессе термического разложения метана.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным, приведенным в табл. 1 и на рис. 1 видно, что с ростом температуры существенно увеличивается процентный выход водорода. Наилучший результат был получен при температуре 770°C. При этой температуре в выходящей смеси содержалось 68% водорода. При этом следует отметить, что при увеличении температуры от 530 до 710°C разложение метана идет наиболее эффективно, т.е. рост содержания водорода соизмерим с уменьшением содержания метана в выходной смеси. А при повышении температуры выше 710°C процентный выход водорода увеличивается незначительно, но на выходе существенно уменьшается содержание метана. Т.е. при температурах свыше 710°C начинается более интенсивное образование побочных тяжелых углеводородов.

Таблица 1. Результаты эксперимента

№ пробы	Т-ра в реакторе, °C	H_2 , %	CH_4 , %	N_2 , %	C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , %
1	530	20,12	71,48	0,77	7,63
2	550	24,2	66,38	0,6	8,82
3	600	35,64	55,42	0,46	8,48
4	650	49,53	37,78	0,37	12,32
5	710	60,1	26,71	0,3	12,89
6	770	68,84	11,05	0,24	19,87

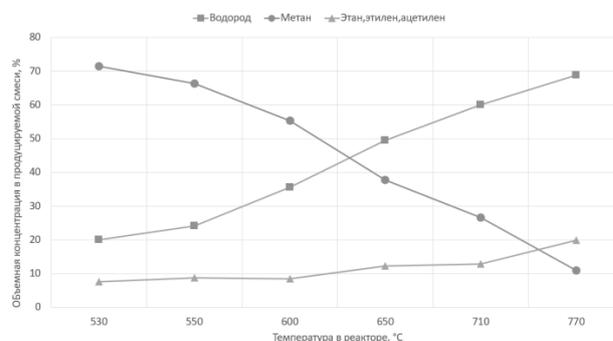


Рис. 1. Объемная концентрация продуктов реакции в зависимости от температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате эксперимента получена зависимость процентного выхода водорода от температуры. Диапазон исследуемых температур от 530°C до 770°C. Получено 68% содержание водорода в газовой смеси на выходе из реактора при температуре 770°C и расходе метана 2 л/ч.

2. С экологической стороны каталитический пиролиз метана является одним из наилучших методов получения водорода, поскольку никак не влияет на парниковый эффект за счет нулевого выброса CO/CO_2 .

3. В ходе исследований каталитического крекинга метана с использованием твердых металлов была выявлена проблема, связанная с отложением твердых углеродных частиц на катализаторе и на внутренних поверхностях реактора. При длительной работе закоксовывание реактора может привести к аварийной остановке экспериментального стенда.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета

УДК 533.6.011

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ БОКОВОЙ СТРУИ СЖАТОГО ВОЗДУХА НА ГОРЕНИЕ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ В КАНАЛЕ

Замураев В.П., Калинина А.П.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская 4/1

Численное изучение горения в высокоскоростном потоке неизменно привлекает внимание исследователей [1,2], так как не только является дешевой альтернативой дорогостоящему эксперименту, но и позволяет увидеть в процессе многие детали, недоступные в эксперименте. Одной из основных проблем, связанных с горением при высоких скоростях потока, являются потери полного давления из-за того, что переход в дозвуковой режим обычно происходит в скачках уплотнения. В работе [1] для решения этой проблемы выдвинута и реализована идея трансзвукового горения.

В [1] для стабилизации трансзвукового горения, инициируемого пакетом газодинамических импульсов, перед внезапным расширением канала осуществляется подача топлива, сгорающего затем в более широкой секции.

Это горение в более широкой секции приводит к эффективному уменьшению площади ее поперечного сечения. Однако истечение из канала должно остаться сверхзвуковым. Желательно также, чтобы подаваемое топливо сгорало по возможности полностью. Данные вопросы требуют отдельного изучения.

В работе исследуется высокоскоростной поток в канале, состоящем из двух секций, при горении углеводородного топлива, подаваемого через осевой инжектор, расположенный в начале первой узкой секции с потоком, имеющим число Маха $M=2.2$. Дополнительное топливо (водород) подается перед внезапным расширением канала и горит преимущественно в выходной более широкой секции. Для интенсификации горения в широкой секции также подается сжатый воздух различной температуры. Из канала продукты реакций вытекают в ресивер. Численно изучено, как температура сжатого воздуха влияет на параметры течения в широкой части канала.

Горение в высокоскоростном потоке изучается в осесимметричной постановке. Форма и размеры канала близки к экспериментальным [1]. Углеводородное топливо, подаваемое через осевой инжектор, моделируется идеальным газом. Перед второй секцией через патрубков подается дросселирующая струя, инициирующая горение топлива. В качестве математической модели течения используется система нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса с k - ϵ -моделью турбулентности и уравнений

упрощенной химической кинетики с брутто-реакциями (для керосина и водорода) из базы данных ANSYS Fluent. Для производства турбулентной кинетической энергии используется ограничитель со значением константы Production Limiter Clip Factor = 1. Более подробно постановка задачи описана в [2].

Численно моделируется следующая последовательность процессов. Давление торможения потока $7 \cdot 10^5$ Па. Газообразное углеводородное топливо, моделируемое мономолекулярным веществом с эффективной химической формулой $C_{12}H_{23}$, вытекает через осевой инжектор в начале первой секции постоянного сечения. Само оно не воспламеняется. В первой, более узкой секции постоянного сечения подаются газодинамические импульсы различной амплитуды (давление торможения от 4 до $6 \cdot 10^5$ Па), чтобы инициировать горение. Когда процесс горения установится, перед расширением подается водород под давлением $3 \cdot 10^5$ Па. После того, как струя водорода достигнет выхода из канала, осуществляется поперечная боковая подача сжатого воздуха в широкой секции постоянного сечения под давлением $3 \cdot 10^5$ Па. Рассмотрены температуры 300 К и 1000 К. В обоих случаях наблюдается разрушение ударно-волновой структуры, формирующейся в начале широкой секции постоянного сечения, различия незначительны.

Таким образом, показано, что при этих достаточно малых давлениях влияние температуры мало, так как смешение сжатого воздуха с водородом слабое. Возможно, влияние температуры скажется при более высоких давлениях, при которых подается сжатый воздух.

Список литературы:

1. Третьяков П. К. Организация эффективного горения керосина в канале при больших скоростях потока // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56, № 1. С. 42-47.
2. Замураев В.П., Калинина А.П. Формирование околосредней области в канале переменного сечения при различных температурах торможения потока // Теплофизика и аэромеханика. - 2020. Т.27, No.3. С. 357-363.

*Работа выполнена в рамках
Программы фундаментальных научных исследований
государственных академий наук на 2021–2023
(проект № 121030500157-3)*

УДК 621.9

БЕСКОНТАКТНЫЙ ПЕРЕНОС ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ГАЗОВУЮ ФАЗУ В ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОМ ПРОЦЕССЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ЛЕТУЧЕГО МЕТАЛЛОКОМПЛЕКСА В ЦЕЛЕВОЙ СТРУКТУРЕ**Игуменов И.К.¹, Шутилов Р.А.¹, Лукашов В.В.²**¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Изучение формирования, роста и разрастания слоев для различных вариантов MOCVD процессов продолжает оставаться очень важной проблемой, связанной в первую очередь, с существенным ростом требований к их функциональным параметрам. В настоящее время химия исходных летучих прекурсоров для MOCVD развита достаточно хорошо и может обеспечить осаждение широчайшего круга слоев различного функционального назначения с использованием соединений, относящихся к различным классам. В подобной ситуации наиболее актуальным является поиск методов управления процессами формирования слоев заданной структурой, составом и морфологией. Наиболее перспективными направлениями являются использование различных (дополнительных) методов стимуляции реакции распада летучего прекурсора и оптимизация зоны осаждения покрытий путем комбинации различных технических приемов, основным из которых является прецизионное управление соотношением реагентов в зоне реакции. Классическим примером является процесс ALD (Atomic Layer Deposition). К настоящему моменту имеется ряд работ, учитывающих перенос пара прекурсора в рамках непрерывных моделей в ALD процессах. Однако, в этих работах не рассматриваются газодинамические процессы в щелевых дисковых структурах с высоким аспектным отношением. Впервые эффект переноса изображения был обнаружен при осаждении оксидных слоев в модельной дисковой щелевой конструкции методом вакуумного импульсного MO CVD (метод химического осаждения из паровой фазы из металлорганического прекурсора) с дискретной дозировкой реагентов без использования газа-носителя на оригинальной DD MOCVD установке разработанной и изготовленной в ИНХ СО РАН. Перенос изображения осуществлялся от подложки имеющей металлизированный рисунок на стеклянной поверхности на противоположную ей подложку в виде рельефной наноразмерной оксидной пленки при проведении не менее 50-100 циклов. Фактически речь идет о различных скоростях роста оксидного слоя в результате протекания химической реакции распада летучего прекурсора на соседних участках равномерно нагретой однородной поверхности. В данной работе нами были проведены эксперименты по осаждению пленок на щелевую конструкцию с металлизированным рисунком на установке потокового MOCVD и на установке ALD

фирмы «PICOSUN», в обоих случаях перенос изображения отсутствовал. Данные эксперименты подтверждают, что эффект переноса изображения может быть осуществлен только в условиях квазистационарного газового равновесия, обеспечиваемого в реакционной камере установкой DD MOCVD.

Были проведены систематические эксперименты с использованием модуляторов, изготовленных из различных материалов -кремний, алюминий, кварц и германий. Выбор данных материалов определялся значениями коэффициентов серости. В качестве прекурсора использовали $\text{Hf}(\text{dpm})_4$, Все эксперименты проводили в интервале параметров, при которых устойчиво проявлялся эффект переноса для всех 2D модуляторов. Были проведены эксперименты по осаждению металлических слоев в щелевые структуры. В качестве прекурсоров использовали $\text{Ru}(\text{aa})_3$, $\text{Pd}(\text{hfa})_2$ и $\text{In}(\text{aa})_3$. Модуляторы «Крест» (хром/стекло), использованные нами в предыдущих экспериментах, подложки стеклянные с хромовым рисунком. Для $\text{Pd}(\text{hfa})_2$ и $\text{Ru}(\text{aa})_3$ эксперименты проводили при различных температурах в атмосфере водорода, а для $\text{In}(\text{aa})_3$ – в кислороде. При пиролизе газовой фазы ацетилацетоната индия выделяется оксид индия, обладающий металлическим типом проводимости. Расстояние между модулятором и подложкой варьировали в интервале 0,25 – 0,50 мм. $\text{Ru}(\text{aa})_3$ при пиролизе в водороде осаждается в виде Ru/RuO_2 , а $\text{Pd}(\text{hfa})_2$ – образует металлическую пленку. Пленки формируются на обеих сторонах щелевой структуры, однако не далее 3-4 мм от края. Эффект с различной степенью контрастности воспроизводится для значительного числа различных модуляторов в широком интервале экспериментальных параметров при использовании широкого круга прекурсоров.

На данном этапе исследования мы считаем, что основной причиной различия скоростей реакции на разных участках поверхности подложки является наличие устойчивых областей повышенной концентрации прекурсора.

Список литературы:

1. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы / Давыдов Ю.И., Дзюбенко Б.В., Дрейцер Г.А. и др.; Под ред. Иевлева В.М. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
2. Суржиков С.Т. Перенос излучением в неоднородном слое // ТВТ. 1997. Т. 35. № 3. С. 1-2.

УДК 532.525.5

РАЗЛИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ПЛОСКОЙ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА НА ДО- И СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ ИЗ СОПЛА

Катасонов М.М., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г.

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,
г. Новосибирск, Россия 630090, Россия.

Цель данной работы состояла в экспериментальном исследовании диффузионного горения плоской микроструи водорода, истекающей из щелевого микросопла на до- и сверхзвуковой скорости (см. рис.1).

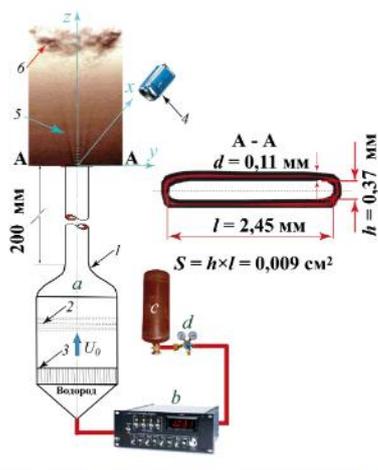


Рис. 1. Схема эксперимента: а – сопловой аппарат; б – блок управления электромагнитным клапаном расхода; с – баллон сжатого водорода (100 атм.); d – редуктор. Сопловой аппарат (а) состоит из форкамеры (1), набора детурбулизирующих сеток (2), хонейкомба (3) и микротрубки длиной 200 мм с щелевым микросоплом. С помощью цифровой видеокамеры или тепловизора (4) фиксировались теневые картины сверхзвуковых ячеек (5) или топология пламени (6).

В результате экспериментальных исследований получены четыре сценария диффузионного горения плоской микроструи водорода, включая горение при наличии сверхзвуковых ячеек, как по воздуху, так и по водороду (см. рис.2).

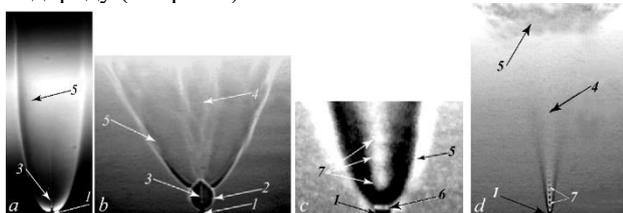


Рис. 2. Четыре сценария диффузионного горения плоской водородной микроструи при изменении ее скорости: $U_0 \leq 150$ м/с (а), $U_0 = 150$ м/с (б), $U_0 = 330$ м/с (в) и $U_0 = 1280$ м/с (д); 1 – микроджег, 2 – «узкая область пламени», 3 – ламинарная микроструя, 4 – турбулентная микроструя, 5 – пламя, 6 – поднятое пламя, 7 – сверхзвуковые ячейки.

Установлено, что стабилизация дозвукового горения микроструи водорода связана с наличием «области перетяжки пламени», а сверхзвукового – с наличием сверхзвуковых ячеек. Обнаружен гистерезис процесса диффузионного горения плоской микроструи водорода в зависимости от способа поджигания микроструи (вблизи или вдали от среза сопла) и направления изменения скорости ее истечения (роста или уменьшения) (см. Рис.3).

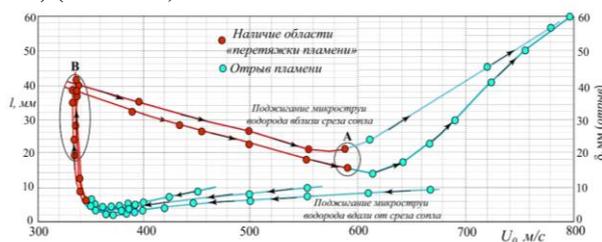


Рис.3.

Для первого режима (сценария) истечения водорода было найдено влияние акустического поля на структуру плоской струи (Рис.4)

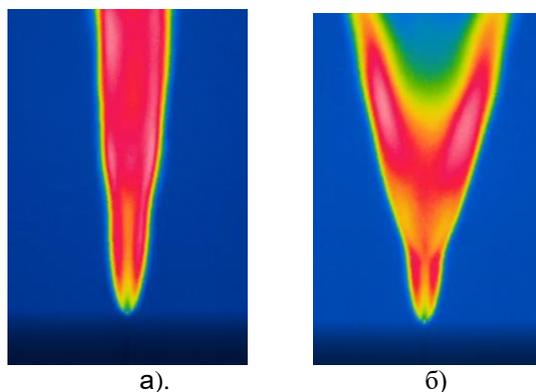


Рис.4. Влияние акустического поля на форму пламени при скоростях истечения менее 150 м/с (а) без акустического поля, (б) с наложенным акустическим полем (амплитуда 95 dB, $f=5500$ Hz).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 22-19-00151, <https://rscf.ru/22-19-00151/>

УДК 621.18

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОТЛЕ

Ковальнов В.Н., Федоров Р.В., Генералов Д.А., Карпов Д.А.

Лаборатория междисциплинарных проблем энергетики
Ульяновского государственного технического университета,
432027, Россия, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

Производство тепловой и электрической энергии на ТЭС в условиях удорожания углеводородного топлива, ужесточения экологических требований, сокращения доступа к импортному оборудованию требует разработки новых технических и технологических решений по наиболее эффективному и экологически чистому сжиганию в энергетических установках ТЭС топлива. Ключевым показателем эффективности производства тепловой и электрической энергии выступает условный расход топлива. Для электростанций удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии должен стремиться к значению менее 250 г/кВт·ч. Для этого требуется обеспечение возможно полного сгорания топлива.

На процесс горения влияет аэродинамика топочной камеры, поскольку она определяет интенсивность смешения топлива с продуктами сгорания [1]. Химические реакции горения в топочном процессе протекают с высокой скоростью, при этом определяющим условием является обеспечение оптимальных условий смешения топлива с воздухом, зажигания и выгорания топлива. Основным загрязняющим веществом при сжигании природного газа в энергетических установках являются термические оксиды азота, основным показателем интенсивности образования которых выступает температура в зоне активного горения. Для снижения выбросов NO_x с дымовыми газами применяется ряд мероприятий, в том числе секционирование топки, рециркуляция дымовых газов, снижение температуры воздуха, впрыск влаги в зону горения, ступенчатого сжигания и др. документы оформляются отдельно.

Одним из инструментов для уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу и повышения КПД котла, моделируемых в этой работе, является третичное дутье. В паровых котлах третичное дутье относится к процессу подачи воздуха в котел после основного горения топлива и вторичного дутья. Этот процесс позволяет обеспечить дожигание топлива [2]. За счет использования третичного дутья удается значительно уменьшить количество окислов азота (NO_x), содержащихся в выбросах, что делает этот процесс очень важным для соблюдения экологических норм.

Подходы вычислительной гидрогазодинамики в средах численного моделирования позволяют моделировать различные режимы работы котлов и процессы горения топлива, состоящего из закрученных потоков нескольких видов газа без риска для критических ситуаций связанных с повреждением оборудования и при этом открывая возможность для получения большого количества данных по состоянию и различным режимам работы оборудования [3]. В условиях уже-

сточения экологических требований определение оптимальных условий сжигания топлива является актуальной задачей.

Моделирование выполнено в среде STAR-CCM+. Объектом исследования выбран энергетический котел ТГМЕ-464 (Е-500-13,8-560ГМН). Построена твердотельная модель котла. Для расчетов сгенерирована расчетная сетка. Вдвух третичного воздуха организован выше верхнего яруса горелок. Смоделировано два случая – вдвух с фронтального экрана (навстречу факелу) и с заднего экрана. В обоих случаях моделирование эмиссии NO_x выполнялось при паровой нагрузке 400 т/ч.

Simcenter STAR-CCM+

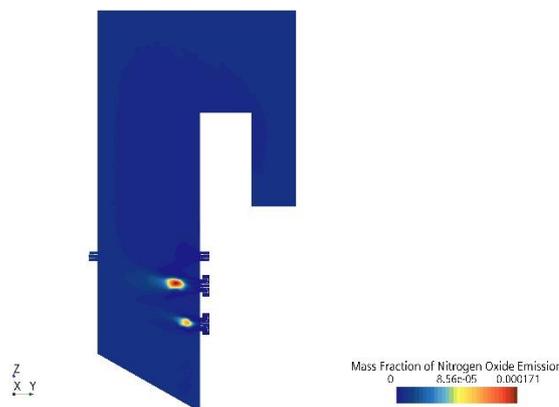


Рис. 1. Вдвух третичного воздуха с фронтального экрана.

По мере увеличения доли подаваемого воздуха концентрация NO_x снижается. При вдвух третичного воздуха с заднего экрана достигается снижение концентрации NO_x на 2,8 % при одних и тех же параметрах и нагрузке.

Список литературы:

1. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. / Мигай В.К. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд. 1987. 264с.
2. Штым К.А., Лесных А.В., Головатый С.В. Анализ влияния третичного дутья на образование оксидов азота в топке котла БКЗ-210-140 // Опыт эффективного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). М.: издательство «Горная книга», 2014. № 12. С. 75-79.
3. Hidetoshi A. Boiler Digital Twin Applying Machine Learning / A. Hidetoshi, K. Domoto et al.//Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 55 No. 4 (December 2018)

Работа выполнена при поддержке мегагрантом Правительства Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-584

УДК 544.43

КИНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОСТИЖИМОСТИ ТОЧКИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ ХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Козлова М.А., Шаманский В.А.

Институт энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Основную сложность в моделировании реагирующих систем вносят химические реакции, которые развиваются в пространстве и во времени с выделением или поглощением тепла и изменением состава системы. Брутто-форма реакций является упрощённым представлением о механизме химических превращений. В действительности такие превращения представляют собой множество последовательных и параллельных элементарных реакций с образованием промежуточных компонентов в соответствии с кинетическим механизмом, реализуемым в данных условиях [1]. Даже для сравнительно простых по исходному составу систем число элементарных реакций, для каждой из которых необходимо записать дифференциальное кинетическое уравнение, может достигать не одного десятка.

Предполагая, что система равновесна, можно рассчитать количества компонентов, решив задачу выпуклого программирования для поиска точки конечного равновесия при постоянных давлении P и температуре T (минимум энергии Гиббса G) в виде [2]:

найти

$$\min(G(\mathbf{x}, P, T))$$

при условиях

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{x}^0 &= \mathbf{A}\mathbf{x}, \\ \mathbf{x} &\geq 0, \end{aligned}$$

где \mathbf{x} - равновесные количества веществ, моль; \mathbf{x}^0 - их начальные количества, моль; \mathbf{A} - матрица стехиометрических коэффициентов.

Вместе с тем достижимость этой точки в пространстве составов из данного начального состояния не очевидна. Вообще термодинамическая достижимость точки конечного равновесия реагирующей системы, как известно, существует из любой точки [2] химического пространства, отвечающей условию сохранения материального баланса, приведенному выше. Однако достижимость конечного (равновесного) состава из данного начального должна обеспечиваться цепочкой непрерывных химических превращений с участием ряда промежуточных веществ. Эти вещества должны присутствовать в списке химического состава системы и участвовать в кинетической модели. В газовой фазе элементарные химические реакции являются обратимыми и двухчастичными [3,4]. Поэтому, например, для «простой» брутто-реакции горения метана: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$, которая при термодина-

мической оценке полностью протекает при стехиометрических соотношениях, в состав системы необходимо ввести еще около полутора десятка промежуточных веществ, чтобы проложить непрерывный путь от начальной точки ($\text{CH}_4 + \text{O}_2$) до конечной ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) [4]. Таким образом, в реальных химических системах помимо термодинамической достижимости точки конечного равновесия необходима «кинетическая» достижимость, формирующая механизм двухчастичных химических превращений и тем самым необходимую детальность математической модели динамики реагирующих систем.

Кинетический механизм химических превращений можно представить в виде ориентированного гиперграфа, где вершинами являются вещества присутствующие в системе, а дугами – их элементарные взаимодействия [3]. Анализ такого графа позволит установить пути образования тех или иных компонентов системы, кинетически недостижимые вещества в данном химическом пространстве, связность химических переходов и др.

На первом уровне графа находятся исходные вещества, из которых поэтапно в результате двухчастичных взаимодействий образуются все остальные. Список компонентов реакций контролируется термодинамической оценкой, проводимой из условия поэтапно равновесного состояния системы. Кинетический анализ достижимости точки конечного равновесия проведен на примере горения метана в кислороде для случаев бедной и богатой смеси.

Список литературы:

1. Основы химической кинетики. / Бенсон С. Пер. с англ. М.: Мир, 1964. 603с.
2. Технология термодинамического моделирования. Редукция моделей движения к моделям покоя / Каганович Б.М., Кейко А.В., Шаманский В.А. и др. Новосибирск: Наука. 2010. 236с.
3. Козлова М.А., Шаманский В.А. Построение графа химических реакций для анализа реагирующих систем // ИМТ. 2022. № 4(28). С. 108-118.
4. Окислительная конверсия природного газа. / Арутюнов В.С. М.: Красанд, 2011. 590 с.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-29-00406
с использованием ресурсов ЦКП
"Высокотемпературный контур"
(Минобрнауки России, проект № 13. ЦКП.21.0038)*

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Крайнов А. Ю., Моисеева К.М.

Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Скорость горения газовзвеси угольной пыли определяется набором взаимосвязанных параметров: дисперсностью, содержанием летучих компонентов в частицах, массовой концентрацией частиц, содержанием горючих компонентов в газе. В работах [1, 2] показано, что на характеристики горения газовзвесей влияет лучистый теплоперенос. В работе [3] было показано влияние лучистого теплопереноса на минимальную энергию искрового зажигания взвеси наноразмерной угольной пыли. Постановка задачи основывалась на допущениях работы [4] относительно закона лучистого теплопереноса.

В настоящей работе исследовано горение газовзвеси угольной пыли в метановоздушной смеси с учетом лучистого теплопереноса.

Математическая постановка задачи основана на двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды и для заданных допущений [3] определяется системой уравнений, записанной в консервативной форме в декартовой системе координат:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u_g}{\partial r} = \sum_{i=1, N_f} (G_{1,i} + G_{2,i}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_g u_g}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u_g^2 + p_g)}{\partial x} = \sum_{i=1, N_f} [-\tau_{tr,i} + (G_{1,i} + G_{2,i}) u_{p,i}], \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_{ox}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{ox} u_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_g D_g \frac{\partial a_{ox}}{\partial x} \right) - \left(\sum_{i=1, N_f} (\alpha_2 G_{2,i}) + \alpha_3 G_3 + \alpha_4 G_4 \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_{gl}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{gl} u_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_g D_g \frac{\partial a_{gl}}{\partial x} \right) + \sum_{i=1, N_f} G_{1,i} - G_3, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_g E_g}{\partial t} + \frac{\partial [\rho_g u_g E_g + p u_g]}{\partial x} = Q_4 G_4 + Q_3 G_3 + \sum_{i=1, N_f} [(G_{1,i} + G_{2,i})(0.5 u_{p,i}^2 + c_p T_{p,i}) - u_{p,i} \tau_{tr,i}] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \sum_{i=1, N_f} \alpha_{p,i} n_{p,i} S_{p,i} (T_{p,i} - T_g), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial \rho_f u_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_g D_g \frac{\partial a_f}{\partial x} \right) - G_4, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_{pl,i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{pl,i} u_{p,i}}{\partial x} = -G_{1,i}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_{p,i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{p,i} u_{p,i}}{\partial x} = -(G_{1,i} + G_{2,i}), \quad (8)$$

$$\frac{\partial (\rho_{p,i} u_{p,i})}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{p,i} u_{p,i}^2}{\partial x} = \tau_{tr,i} - (G_{1,i} + G_{2,i}) u_{p,i}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_{p,i} (\epsilon_{p,i} + 0.5 u_{p,i}^2)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{p,i} u_{p,i} (\epsilon_{p,i} + 0.5 u_{p,i}^2)}{\partial x} = Q_2 G_{2,i} - Q_1 G_{1,i} - \alpha_{p,i} S_{p,i} n_{p,i} (T_{p,i} - T_g) - (G_{1,i} + G_{2,i}) (c_p T_{p,i} + 0.5 u_{p,i}^2) + \tau_{tr,i} u_{p,i} - G_{icl}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial n_{p,i}}{\partial t} + \frac{\partial n_{p,i} u_{p,i}}{\partial x} = 0, \quad (11)$$

$$p_g = \rho_g R_g T_g. \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sum_{i=1,2} 3n_{k,i} S_{km,i}} \frac{\partial U_c}{\partial x} \right) = - \sum_{i=1,2} n_{k,i} S_{km,i} (4\sigma \epsilon T_{k,i}^4 - U_c) \quad (13)$$

Граничные и начальные условия задавались аналогично [3, 4]. Основные обозначения соответствуют [3].

Решение задачи выполнено с использованием метода Ван Лира для газа и А. Н. Крайко для частиц.

Значения исходных параметров соответствовали работе [3]. В расчетах варьировался состав газовзвеси. Из численного решения определялась видимая и нормальная скорость горения газовзвеси угольной пыли.

Список литературы:

1. Torrado D. etc Explosions of methane/air/nanoparticles mixtures: Comparison between carbon black and inert particles // Process Safety and Environmental Protection. 2017. V.110. Pp. 77-88.
2. Torrado, D. etc Numerical study of the influence of particle reaction and radiative heat transfer on the flame velocity of gas/nanoparticles hybrid mixtures // Process Safety and Environmental Protection. 2018. V.118. Pp. 211-226.
3. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu. Effect of radiation transport on minimal sparkplug ignition energy of nanosized coal-dust suspension // KEM. 2018. Vol. 769. pp 311-316.
4. Крайнов А.Ю. Влияние лучистого теплопереноса на минимальную энергию искрового зажигания газовзвесей // ФГВ. 2001. Т. 37, № 3. С. 16-24.

Работа поддержана Российским научным фондом
(грант № 21-71-10034)

УДК 536.46, 620.9

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ БИБЛИОТЕКИ ФЛЕЙМЛЕТ-РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ТРАКТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ГОРЕЛКИ

Красинский Д.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Одним из путей повышения экологических характеристик при сжигании углеводородных топлив является специально организованный подвод водяного пара в зону горения, способствующий интенсивному протеканию реакций паровой газификации. В соответствии с этой концепцией, в ИТ СО РАН разработаны лабораторные образцы перспективных горелочных устройств, особенностью конструкции которых является аксиальный вдув высокоскоростной струи перегретого водяного пара в зону реагирования. В ряде предыдущих работ [1–2], в т.ч. на основе численного моделирования [3], для такого горелочного устройства мощностью от 5 до 20 кВт исследовались процессы горения испаренного дизельного топлива. При этом численные результаты [3] позволили установить, что за счет воздействия паровой струи в основном канале горелки происходит газификация углеводородного топлива с образованием синтез-газа в приосевой области потока, что приводит к наблюдаемой в экспериментах интенсификации горения во внешнем факеле и улучшению экологических характеристик (низкие уровни выбросов CO, NOx, сажи).

В настоящей работе для аналогичной конструкции горелочного устройства проведено численное моделирование аэродинамики, процессов турбулентного теплопереноса и горения природного газа (состоящего на 93% по объему из метана, а также этана и бутана), при этом подача газового топлива осуществляется путем радиального вдува по периметру корпуса в нижней части горелки. Применяемая физико-математическая модель основана на эйлеровом описании многокомпонентного турбулентного реагирующего потока. Для учета детального химического реагирования в настоящей работе более подробно рассматривается применение флеймлет-модели турбулентного горения.

Сложные химические реакции газофазного горения углеводородов в турбулентных потоках обычно протекают в неравновесном режиме по разветвленным цепочечным механизмам, которые даже в редуцированном виде включают в себя десятки веществ и промежуточных радикалов. Поэтому, для обеспечения вычислительной реализуемости при детализации описания химических реакций в газовой фазе с учетом их неравновесности, в последние годы развит флеймлет-подход [4], основанный на предварительном решении набора одномерных задач (о термодинамическом состоянии смеси) поперек фронта тонкого пламени. Процедура генерации множества флеймлет-решений реализуется в виде базы данных – библиотеки флеймлетов (“flamelet library”, далее – БФЛ), которая характеризуется набором зависимых величин и независимых параметров (аргументов). Зависимые величины –

температура, концентрации компонент и т.п. – находятся из решения для каждого флеймлета. Варьированием независимых параметров определяется собственный набор флеймлетов в БФЛ. Для диффузионных пламен в качестве «базовых» аргументов полагают: консервативный скаляр «доли смешения топлива» ξ (“mixture fraction”), и скорость диссипации скаляра χ , с помощью которой параметризуются эффекты неравновесности. Ещё двумя независимыми параметрами при генерации БФЛ являются: вариация ξ^2 (2-й момент пульсаций ξ) для «адаптации» ламинарных флеймлетов к влиянию турбулентных флуктуаций, и «дефект энтальпии» ΔH (“enthalpy loss”) для учета неадиабатичности (ввиду лучистого теплообмена и т.п.). Таким образом, число независимых параметров при табуляции термодинамического решения $n=4$. Указаны ограничения применимости данной флеймлет-модели. Для расчёта каждого одномерного флеймлет-решения (в пространстве скаляра ξ) использовался механизм химической кинетики горения природного газа для 62 компонент, участвующих в 398 реакциях, и флеймлет-солвер, входящий в состав CFD-пакета ANSYS [5]. Затем производилось ФПВ-осреднение табличного решения по двухпараметрической β -функции для учета влияния турбулентных пульсаций. Представлены профили температуры и концентраций основных компонент от доли смешения ξ , проведен их анализ при увеличении скорости диссипации χ от 0 до значения $\chi q=41$ с–1, выше которого происходит затухание флеймлетов. В итоге для выполнения CFD-расчетов была построена таблица термодинамического решения размерностью $64 \times 20 \times 54 \times 100$ для 45 компонент смеси (без учета азотсодержащих компонент). На этой основе проведено численное исследование всей совокупности аэротермодинамических процессов при горении природного газа в тракте и внешнем факеле перспективного горелочного устройства ИТ СО РАН.

Список литературы:

1. Алексеев С.В., Пашенко С.Э., Саломатов В.В. Нанокластерное инициирование горения некондиционных углеводородных топлив // ИФЖ. 2010. Т. 83. № 4. С. 682–693.
2. Алексеев С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Характеристики процесса сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара // ФГВ. 2016. Т. 52. №3. С. 37–44.
3. Krasinsky D.V. Numerical simulation of hydrocarbon fuel combustion processes in a burner with axial injection of steam jet // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 1105. No. 1. Article 012035.
4. Peters N. Turbulent Combustion. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2000.
5. ANSYS Fluent User’s Guide. ANSYS Inc., 2018.

УДК 536.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖИДКОСТНОЙ ЗАВЕСЫ ДЛЯ ЭКРАНИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ОЧАГА ВОЗГОРАНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ

Кузнецов Г.В., Волков Р.С., Жданова А.О., Свириденко А.С., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Возгорания горючих жидкостей на производственных площадях и территориях хранилищ приводят, как правило, к пожарам класса “В”. Согласно [1] пожары с участием определенных классов горючих жидкостей ликвидируются с применением специализированных методик. Широко распространенным в области пожарной безопасности является экранирование теплового излучения с использованием завес из очищенной или морской воды [2]. Представляет интерес оценка требуемых характеристик водяной завесы для условий различных причин возгораний веществ, таких как открытое пламя, нагретая поверхность и короткое замыкание. Мотивация настоящего исследования связана со слабой изученностью влияния источников пожарной опасности на динамику изменения тепловых потоков и связи с ними адаптивных параметров жидкостных завес.

Цель настоящей работы – определение по результатам экспериментальных исследований необходимых и достаточных параметров жидкостной завесы для экранирования теплового излучения при наиболее типичных причинах возгораний веществ и материалов в помещениях.

В качестве горючего материала для формирования модельных очагов пожара использованы три широко распространенных вида топлива (керосин, дизельное топливо, бензин). В качестве жидкостей для формирования водяной завесы выбраны четыре различных состава, отличающиеся по структуре и физическим свойствам (вода без примесей, раствор бишофита (10 wt%), суспензия бентонита (5 wt%), эмульсия пенообразователя (5 wt%)).

Для определения влияния характеристик экранирования водяной завесой теплового излучения очага пожара в помещениях использовался экспериментальный комплекс, схема которого представлена на рис. 1. Экспериментальный комплекс включает средства для создания теплового излучения (5, 6), жидкостной завесы (7, 8, 9), а также для определения характеристик теплового потока (1, 2, 3, 4). На объекте защиты 4 закреплены термопары 3 типа К для регистрации температуры поверхности объекта защиты. Объект защиты представлял собой поглощающий экран размерами 0,3×0,2 м, выполненный из листа картона толщиной 1 мм, окрашенного черной матовой краской (плотность картона – около 350 кг/м³, степень черноты окрашенной поверхности $\varepsilon \approx 0,9$). Для подключения и опроса термопар использовался модуль аналогового ввода 2 National Instruments NI 9219, для записи показаний – персональный компьютер 1. На расстоянии L от объекта защиты 4 устанавливался источник лучистого теплового потока 5. Вокруг источника лучистого теп-

лового потока 5 находился металлический экран 6, который направлял тепловое излучение (q) в сторону объекта защиты 4. Между источником лучистого теплового потока 5 и объектом защиты 4 создавалась жидкостная завеса 8, генерируемая распылительной форсункой 7. Поперечный размер жидкостной завесы H регулировался посредством изменения расстояния между стальными листами 9. Распылительная форсунка 7 и стальные листы 9 устанавливались и закреплялись на специализированных профилях.

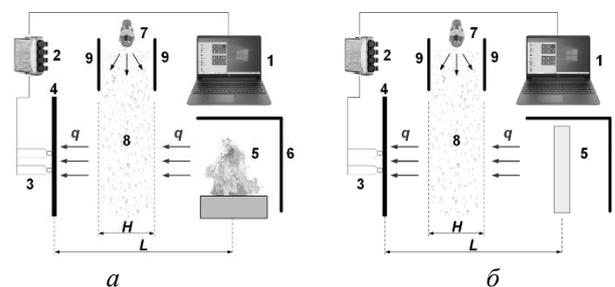


Рис. 1. Схема экспериментального комплекса при использовании в качестве источника лучистого теплового потока модельного очага (а) и нагревательной поверхности (б): 1 – персональный компьютер; 2 – модуль аналогового ввода; 3 – термопары; 4 – объект защиты; 5 – источник лучистого теплового потока (q); 6 – экран источника лучистого теплового потока; 7 – распылительная форсунка; 8 – жидкостная завеса; 9 – стальные листы для регулировки поперечного размера завесы.

По результатам выполненных экспериментов можно сделать следующие основные выводы о том, что увеличение поперечного размера жидкостной завесы в диапазоне 0,1–0,3 м способствует снижению мощности лучистого теплового потока от очага пожара на 28–45%. Также снижение скорости движения капель от 4 м/с до 2,5 м/с приводит к увеличению времени их нахождения между объектом излучения и объектом защиты, что приводит к снижению мощности лучистого теплового потока от очага пожара на 45–55%.

Список литературы:

- GOST 27331-87. Fire engineering. Classification of fires., 1987. <https://fireman.club/normative-documents/gost-27331-87-klassifikatsiya-pozharov/>.
- Dombrovsky L.A., Dembele S., An improved solution for shielding of thermal radiation from fires using mist curtains of pure water or seawater // Comput. Therm. Sci. 2022. V.14. P. 1–18. <https://doi.org/10.1615/ComputThermalSci.2022041314>.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ (проект 21-19-00009, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00009/>)

УДК 621.9

СКОРОСТНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КАТАЛИТИЧЕСКОМ ОКИСЛЕНИИ H₂

Леманов В.В., Лукашов В.В., Шаров К.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Каталитические поверхности находят широкое применение в современных технологических процессах и в энергетике. Например, горение в каналах с каталитической поддержкой на стенке [1]. Каталитическая поверхность обладает способностью оказывать влияние на устойчивость горения в газовой фазе. В работе [2] показано, что при воспламенении гомогенных газовых смесей углеводородов с окислителем наличие металлической платины в бомбе постоянного объёма стабилизирует горение, подавляя пульсации давления. Оценки влияния динамики течения на особенности кинетики каталитического окисления водорода выходят на первый план при анализе систем пассивной защиты атомных станций [3]. При наличии атмосферного воздуха, содержащегося в нём CO, CO₂ могут накапливаться в каталитической поверхности, качественно изменяя характеристики химического процесса. При экспериментальном изучении кинетики реакции окисления CO наблюдаются различные нелинейные явления, такие как гистерезис, автоколебания и даже хаотическая динамика скорости реакции [4]. Для получения корректных данных важно использовать высокоскоростные методы, с помощью которых можно быстро измерять скорости переходных процессов [5] не меняя свойства катализатора.

Импактные струи можно отнести к одной из наиболее распространенных геометрий химических реакторов. При такой организации потоков струя топливной смеси вытекает из сопла, отверстия или трубки и взаимодействует с плоской или пространственной преградой. В данной работе исследовался теплообмен при натекании на каталитически активную поверхность импактной струи водорода, разбавленного инертным газом [6]. Катализатор, используемый для формирования покрытия на металлическом диске, имел состав 2%Pd/10%CeO_{0,4}ZrO_{0,4}LaO_{0,2}/Al₂O₃. В газовый поток было внесено искусственное возмущение. Выполненные нами термоанемометрические измерения характеризуют это возмущение как гармоническое колебание продольной скорости струи. С помощью тепловизора FLIR x650sc измерялись распределения температуры на поверхности катализатора. Частота регистрации термограмм составляла 1 кГц. Сенсор тепловизора позволял регистрировать инфракрасное излучение с длиной волны от 1,5 до 5,1 мкм.

Наши измерения выявили пульсации температуры на поверхности катализатора в области критической точки. Амплитуда пульсаций температуры убывает по мере удаления от критической точки. Характерные частоты пульсаций безразмерной температуры в наших опытах составляют единицы герц.

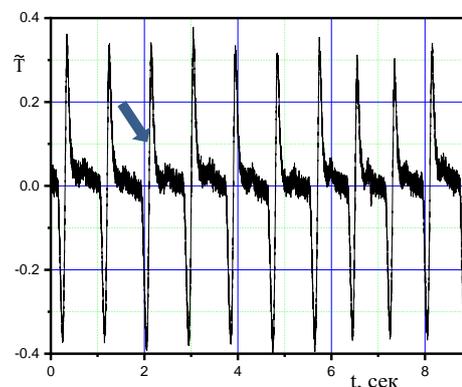


Рис. 1. Пульсации температуры на поверхности Pd катализатора при окислении водорода.

По-видимому, впервые были обнаружены высокоскоростные изменения амплитуды пульсаций температуры на поверхности катализатора (показано стрелкой на рис.1.). Как было показано в работе [5] при окислении CO в присутствии Pd изменение концентрации продукта (CO₂) так же может происходить с большой скоростью. Однако тепловой след был более инерционным. Важным отличием данного исследования является отсутствие в наших условиях гистерезиса при охлаждении и нагреве. Разработанный нами экспериментальный метод даёт возможность измерять скорости реакций в условиях контролируемого диффузией гетерогенного каталитического окисления водорода.

Список литературы:

1. Kim, J.; Yu, J.; Lee, S.; Tahmasebi, A.; Jeon, C.-H.; Lucas, J. Advances in Catalytic Hydrogen Combustion Research: Catalysts, Mechanism, Kinetics, and Reactor Designs // Int. J. Hydrog. Energy. 2021. V.46. 40073–40104.
2. Troshin K. Y., Rubtsov, N. M., Tsvetkov, G. I., Chernysh, V. I. The Influence of Noble Metals on Thermoacoustic Vibrations and Boundaries of the Region of a Negative Temperature Coefficient During Combustion of n-Pentane-Air Mixtures // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2022. T.16. C.39–46.
3. Initiation and Flame Propagation in Combustion of Gases and Pyrophoric Metal Nanostructure. / Rubtsov, N.M.; Seplyarskii, B.S.; Alymov, M.I. Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany. 2021.
4. Lashina E.A., Slavinskaya E.M., Chumakova N.A., Stadnichenko A.I., Salanov A.N., Chumakov G.A., Boronin A.I. Inverse temperature hysteresis and self-sustained oscillations in CO oxidation over Pd at elevated pressures of reaction mixture: Experiment and mathematical modeling // Chem. Eng. Sc. 2020. V.212. 115312.
5. Borodin D., Golibrzuch K., Schwarzer M., Fingerhut J., Skoulatakis G., Schwarzer D., Seelemann T., Kitsopoulos T., and Wodtke A. M. Measuring Transient Reaction Rates from Nonstationary Catalysts // ACS Catal. 2020. V.10. P. 14056–14066
6. Lemanov V., Lukashov V., Sharov K. Hydrogen vortex flow impact on the catalytic wall // Energies. 2023. 16(1). P. 104.

УДК 533.21

ВЛИЯНИЕ ДЕТОНАЦИИ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТУШЕНИЯ ОЧАГА ГОРЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Лобода Е.Л.^{1,2}, Агафонцев М.В.^{1,2}, Старосельцева А.А.¹

¹ Томский государственный университет, г. Томск, Россия
636000, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
634055, Россия, Томск, пр. Академический, 1

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований тушения очага горения растительных горючих материалов (РГМ) при воздействии ударных волн на процессы горения. В качестве образцов РГМ использовалась хвоя сосны предварительно высушенная до влагосодержания 5-7%. Тушение осуществлялось водой, распыляемой форсункой на всю площадь очага горения. Перед началом тушения водой производилось воздействие на зону пиролиза и пламя ударной волной (УВ), формируемой при помощи ударной трубы [1], где в качестве источника энергии применялись строительно-монтажные патроны марок Д1, Д2 и Д3. В результате воздействия УВ происходила детонация продуктов пиролиза [1], приводящая к прерыванию пламенного горения. Следует отметить, что прерывание пламенного горения не всегда обеспечивало тушение очага горения и в ряде случаев пламенное горение возобновлялось. Подача воды осуществлялась непосредственно после воздействия УВ и обеспечивала охлаждение элементов РГМ.

Температура элементов РГМ регистрировалась ИК камерой JADE J520SB в узком спектральном диапазоне 3.7-3.9 мкм, выбор которого обусловлен спектром излучения пламени, рекомендациями [2] и достаточным диапазоном измеряемых температур 400-1100 К. Данный спектральный интервал позволял минимизировать влияние излучения пламени на результаты измерения температуры поверхности РГМ, которая в случае пламенного режима горения экранируется слоем пламени. В данном спектральном интервале длин волн излучение пламени определяется излучением дисперсной фазы конденсированных продуктов горения в пламени, которая существенно ниже интенсивности излучения пламени на длинах волн 2.5-3.1 и 4.0-5.0 мкм [2]. Коэффициент излучения РГМ составлял 0.95. Скорость съемки составляла 25 кадров/с и выбиралась из необходимости длительной записи для регистрации изменения температуры. В отличие от измерений [1], данная скорость съемки и спектральный интервал не позволяли регистрировать детонацию продуктов пиролиза.

На рис. 1 представлен график изменения температуры поверхности РГМ со временем при тушении водой без воздействия УВ (кривая 1) и при воздействии УВ (кривая 2). Пунктирной линией на графике отмечена температура вспышки хвои сосны [3, 4] – 810 К и температура 503 К после которой наблюдалось увеличение темпа снижения температуры поверхности РГМ.

Для снижения температуры поверхности РГМ ниже температуры вспышки без воздействия УВ требовалось 4.77-5.97 г воды, а при воздействии УВ –

3.53-4.8 г воды. Тем не менее снижение температуры поверхности РГМ ниже температуры вспышки не являлось гарантированным тушением, т.к. при определенных условиях в результате тления нижних слоев РГМ пламенный режим мог возобновиться.

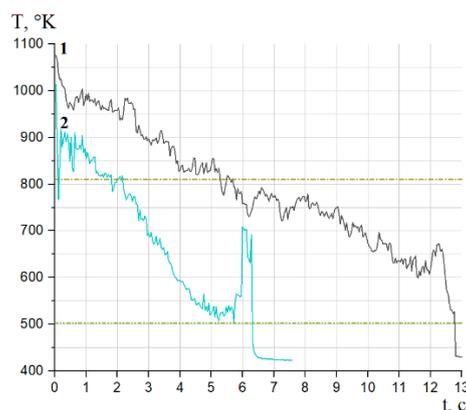


Рис. 1. Изменение температуры поверхности РГМ при тушении очага горения: 1- без воздействия УВ, 2 – воздействием УВ.

Для достижения температуры 503 К после которой наблюдалось быстрое снижение температуры поверхности РГМ требовалось 11.2-13.78 г воды без воздействия УВ и 5.69-6.87 г воды при воздействии УВ.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- в качестве критерия гарантированного тушения очага горения РГМ следует считать снижение температуры поверхности РГМ ниже 503 К.

- при воздействии УВ на очаг горения РГМ в результате детонации продуктов пиролиза [1] происходит прерывание пламенного горения РГМ, что приводит к уменьшению более, чем в два раза, времени орошения очага горения и соответственно расхода воды для гарантированного тушения.

Список литературы:

1. Лобода, Е. Л. Детонационные процессы во фронте горения растительных горючих материалов / Е. Л. Лобода, М. В. Агафонцев, А. А. Старосельцева // Пожарная безопасность. 2023. № 1(110). – С. 27-34. – DOI 10.37657/vniipr.pb.2023.110.1.002.
2. Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В. Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // Известия вузов. Физика. 2015. Т.58. №2. С. 124-128.
3. Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов. - Новосибирск: «Наука». Сиб. отд-ние, 1977. - 239 с.
4. Физика лесных пожаров. / Гришин А.М. Томск: Изд-во Том. ун-та. 1994. 218 с.

УДК 662.739

ВЛИЯНИЕ ДОЛИ ДРЕВЕСИНЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГОРЮЧИХ КОМПОНЕНТ В СИНТЕЗ-ГАЗЕ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ В СМЕСИ С ТОРФОМ

Мисюкова А.Д.^{1,2}, Янковский С.А.^{1,2}, Берикболов А.К.¹¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Энергетическое применение угля тесно связано с существенными антропогенными выбросами в окружающую среду. Данный фактор снижает эффективность применения угля и приводит энергетиков по всему миру к необходимости поиска способов снижения выбросов за счет эффективной очистки дымовых газов энергетического оборудования, или к поискам альтернативных, более экологичных видов топлива, например, смесевых с добавлением углерод-нейтральных добавок [1]. Одним из возможных вариантов альтернативного решения проблемы может стать применение торфа в смеси с древесными отходами [1], так как торф считается высококачественным сырьем из-за его пористости и богатого органического состава [2], а отходы переработки древесины являются углерод-нейтральной добавкой, инициирующей процессы горения в диапазоне более низких температур. Сам по себе торф и древесные отходы не являются топливом для энергетических установок, так как имеют достаточно низкую калорийность, а торф еще и высокую зольность. Однако, способ глубокой переработки смеси торфа и древесных отходов позволит получить не только высокоэнергетический продукт, но и дополнительные полезные продукты в виде синтез-газа и жидких углеводородов. Отсюда появляется необходимость проведения анализа газофазного состава комpositивных топлив, сформированных на основе торфа и древесных опилок при их совместном пиролизе.

В качестве исходного материала был взят торф Суховинского месторождения Томской области, добытый с глубины 0,5-1 м. Добавкой к торфу являлись отходы лесопиления (ЛПК с. Дзержинское, Томская область). Перед началом эксперимента исходные компоненты измельчались с помощью лабораторного измельчителя Stegler-1000. После измельчения компоненты просеивались через лабораторное сито РЛ-1. Частицы торфа просеивались через сито 80 мкм, а частицы древесины через сито с размером ячеек 200 мкм. Затем компоненты смешивались в разном процентном соотношении по массе в течение 5 минут. Масса смеси, помещаемой в тигель, составляла 8 грамм, нагревалась до температуры 600 °С, в период проведения эксперимента проводилась непрерывная продувка инертным газом и выполнялся газовый анализ.

На рисунке 1 приведены типичные результаты газового анализа, полученные при концентрационном соотношении торфа и древесных опилок: а) Т-100 %, б) Т-90 %/Д-10 %; в) Т-75 %/Д-25 %; г) Т-50 %/Д-50 %; д) Т-25 %/Д-75 %; е) Д-100 %.

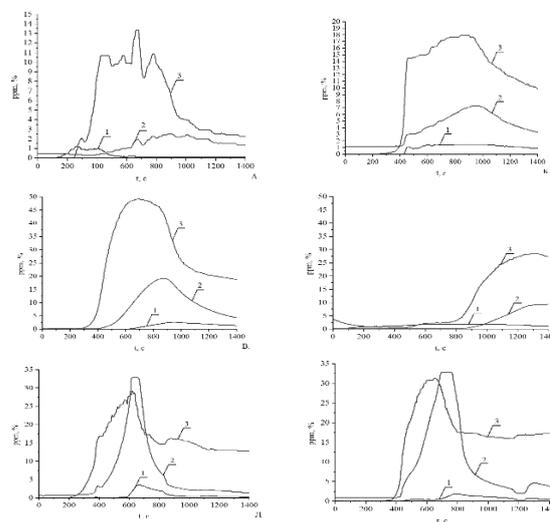


Рис. 1. Изменение концентраций объемных долей горючих компонент H_2 (1), CO_2 (2), CH_4 (3) от концентрационного состава топлива

Основными газообразными продуктами при пиролизе смеси торфа и древесных опилок являются углекислый газ (CO_2), метан (CH_4) и водород (H_2). Концентрация водорода при пиролизе чистого торфа составляла 1,2 %. Наибольшее количество водорода выделилось при пиролизе смеси с концентрацией торфа и опилок 25 % / 75 % и соответствовало значению 3,6 %. Наиболее интенсивное формирование (CH_4) зафиксировано при пиролизе образца с долей биомассы 75 % в смеси, концентрация газа составила 32,8 %. Также определено, что увеличение доли древесных отходов в смеси более чем на 10 % приводит к существенному снижению выделения CO_2 в окружающую среду, например, при соотношении торфа и древесных отходов в смеси 50 % / 50 % концентрация CO_2 составила 13,4 %.

Список литературы:

1. H. Tolvanen, L. Kokko, and R. Raiko, "Fast pyrolysis of coal, peat, and torrefied wood: Mass loss study with a drop-tube reactor, particle geometry analysis, and kinetics modeling," *Fuel*, vol. 111, pp. 148–156, Sep. 2013.
2. Y. Li, H. Zhao, X. Sui, X. Wang, and H. Ji, "Studies on individual pyrolysis and co-pyrolysis of peat–biomass blends: Thermal decomposition behavior, possible synergism, product characteristic evaluations and kinetics," *Fuel*, vol. 310, p. 122280, Feb. 2022.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки
и высшего образования Российской Федерации
в рамках проекта № FZES-2021-0008

УДК 536.46

СТРУКТУРА ФРОНТА ПЛАМЕНИ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПРИ ТЕПЛООТДАЧЕ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**Моисеева К.М., Кантарбаева А.И.**Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Согласно наблюдениям из эксперимента, газовые смеси с содержанием горючего, близким к стехиометрическому, горят в закрытом канале неустойчиво. В работе [1] представлено экспериментальное исследование особенностей распространения пламени стехиометрической пропано-воздушной смеси в закрытом канале. Показано формирование тьюльпанообразного пламени. Образование неустойчивого пламени объяснено гидродинамической неустойчивостью, влиянием пограничного слоя и турбулентности. Численное исследование горения пропано-воздушной смеси в плоском канале представлено в работе [2]. Показано формирование искривленного пламени.

В работе [3] представлено численное исследование горения пропано-воздушной смеси в узком цилиндрическом канале радиусом 2, 1,5 и 1,25 см. Показано возникновение неустойчивости и образование «лепестков» пламени. В работе полагалось, что стенки канала теплоизолированы, не учитывалась вязкость газа.

В настоящей работе исследовано формирование и развитие пламени пропано-воздушной смеси в узком закрытом цилиндрическом канале при теплоотдаче в окружающую среду. Задача решалась в цилиндрической системе координат, в двумерной постановке. Источник зажигания расположен в левом нижнем углу расчетной области. Полагалось, что между пропаном и кислородом протекает химическая реакция, описываемая законом Аррениуса. Учитывалась вязкость, теплопроводность и диффузия газа. Коэффициент вязкости определялся по формуле Сазерленда. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры. Учитывается тепловое расширение газа. Перенос тепла излучением от продуктов сгорания не учитывается. На боковых стенках канала учитывается теплоотдача от стенки в газ.

Решение задачи выполнено с использованием метода Ван Лира [4].

Значения исходных параметров соответствовали работе [3]. Варьировалась ширина канала и температура окружающей среды.

На рис. 1 показано распределение температуры в канале радиусом 0,015 м. Температура стенок – $T_w = 800 \text{ K}$. На начальном этапе пламя распространяется в сторону правой и боковой стенок. К моменту времени $t = 1,1 \text{ мс}$ начинается развитие искривленного фронта пламени. В последующие моменты времени наблюдается образование двух вытянутых «лепестков» пламени. В момент времени $t = 1,7 \text{ мс}$ концы «лепестков» сходятся.

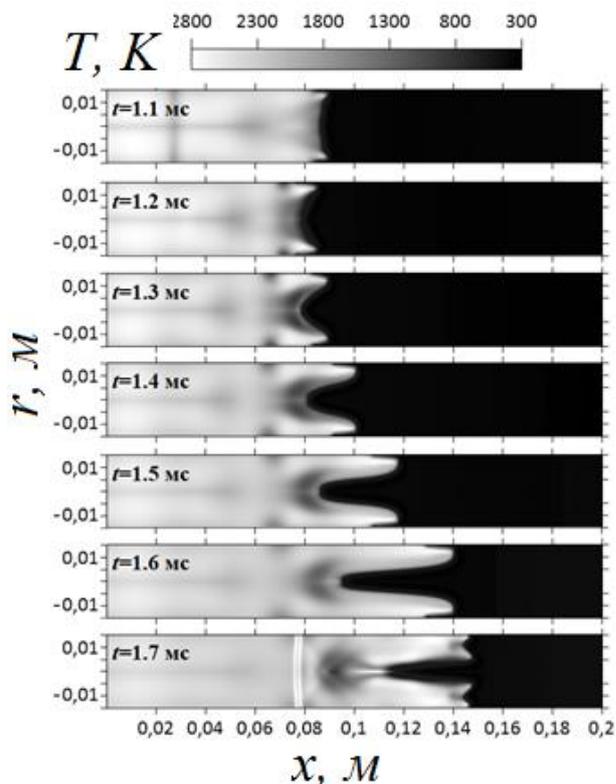


Рис. 1. Распределение температуры газа в канале радиусом 0,015 м.

Неустойчивость пламени на рис. 1 выражена сильнее, чем в работе [3] для канала такого же радиуса. Механизм формирования неустойчивого пламени так же, как и в [3], связан с взаимодействием потоков горячих продуктов реакции и холодной несгоревшей смеси, а также влиянием горячих стенок канала.

Список литературы:

1. Xiaobo Shen, Xuechao He, Jinhua Sun A comparative study on premixed hydrogen–air and propane–air flame propagations with tulip distortion in a closed duct // *Fuel*. 2015. №161. С. 248-253.
2. Xiao H., Houim R. W., Oran E. S. Formation and evolution of distorted tulip flames // *Combust and Flame*. 2015. V. 162. Pp. 4084–4101.
3. Моисеева К.М., Кантарбаева А.И., Крайнов А.Ю. Особенности формирования пламени пропано-воздушной смеси в узком канале // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2023. № 82. С. 141–149.
4. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method // *J. Comput. Phys*. 1979. 32 (1). 101–136.

Работа поддержана Российским научным фондом
(грант № 21-71-10034)

УДК 536.46

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ АЭРОВЗВЕСИ СМЕСИ ПОРОШКОВ БОРА И АЛЮМИНИЯ

Моисеева К.М., Романий Е.И.

Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

В современном мире высокоэнергетические материалы широко используются в различных отраслях промышленности, включая космическую и энергетическую отрасли. Однако, процессы воспламенения и горения таких материалов являются сложными и малоизученными. Для более точного понимания этих процессов необходимо проведение численного моделирования, которое позволит получить количественные оценки закономерностей горения.

В работе представлено параметрическое исследование воспламенения и горения аэровзвеси смеси порошков бора и алюминия, зависимость скорости горения от массового процентного содержания частиц бора в смеси и от общей массовой концентрации смеси.

Постановка задачи основана на работе [1] и описывается уравнениями неразрывности, сохранения импульса и энергии газа и частиц; уравнениями баланса массы кислорода и газообразных продуктов реакции ($B_2O_3(g)$) в газе, жидкого оксида бора на частицах; счетной концентрации частиц; уравнением состояния газа.

Задача решалась методом С. К. Годунова [2] для газа и методом распада произвольного разрыва для частиц [3]. Шаг по времени определялся из условия устойчивости Куранта-Фридрихса, шаг по пространству составил 10^{-5} м до координаты 0,2 м, далее шаг по пространству увеличивался по правилу $h_{i+1} = h_i \cdot 1.01$.

Расчёты выполнены при варьировании радиуса частиц бора и алюминия в диапазоне 0,5 – 3 мкм. Массовая концентрация смеси частиц изменялась от 0,2 кг/м³ до 0,5 кг/м³. Массовое процентное содержание частиц бора в газозвеси в параметрических расчетах задавалось равным 25, 30, 50, 75 %.

На рисунках 1 – 2 показаны примеры полученных результатов. На рис. 1 показана зависимость видимой скорости горения газозвеси смеси порошков алюминия и бора от радиуса частиц бора. На рис. 2 представлена зависимость видимой скорости горения от общей массовой концентрации частиц с газозвеси.

При увеличении процентного содержания частиц бора в смеси скорость горения уменьшается (рис. 1). С увеличением массовой концентрации смеси при значениях процентного содержания бора в смеси 50 и 75 % скорость горения уменьшается. Для процентного содержания частиц бора 25 и 30 % видимая скорость горения увеличивается при изменении общей массовой концентрации частиц от 0,2 кг/м³ до 0,3 кг/м³. Для больших массовых концентраций видимая скорость горения уменьшается с увеличением массовой концентрации частиц.

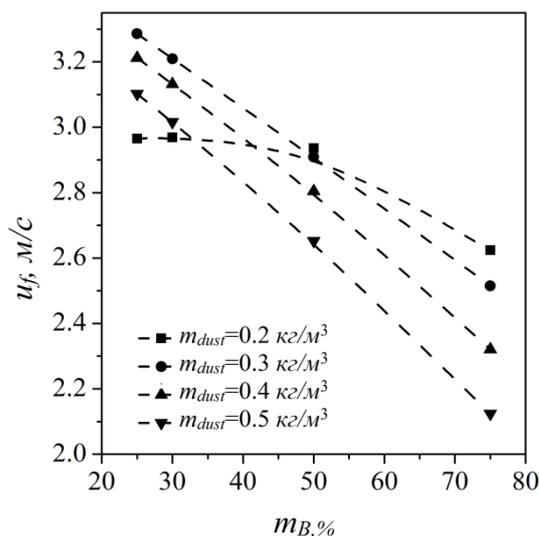


Рис. 1. Видимая скорость горения аэровзвеси смеси порошков бора ($r_B = 2$ мкм) и алюминия ($r_{Al} = 1$ мкм).

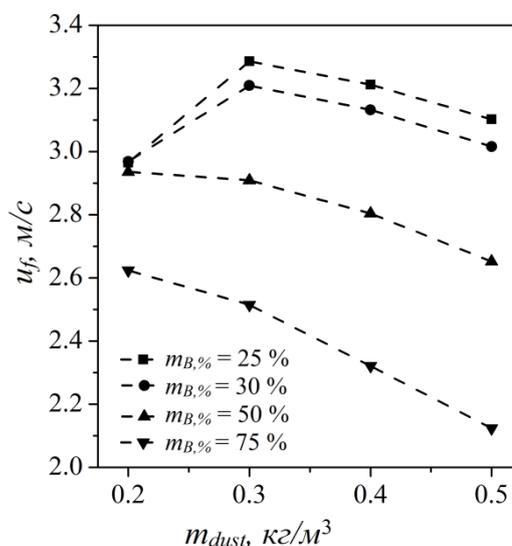


Рис. 2. Видимая скорость горения аэровзвеси смеси порошков бора ($r_B = 2$ мкм) и алюминия ($r_{Al} = 1$ мкм).

Список литературы:

1. Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А., Моисеева К. М., и др. Математическое моделирование горения газозвеси порошка бора // ИФЖ. 2021. Т.94, №2. С. 360 – 371.
2. Годунов С.К., Забродин А. В., Иванов М. Я., и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
3. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной 'собственного' давления // ПММ. 1979. Т. 43, № 3. С. 500-510.

Работа поддержана стипендией Президента (СП-134.2022.1.)

УДК 536.46

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА УСКОРЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
КОНИЧЕСКОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ ЭТАНОЛА В ГАЗОКАПЕЛЬНОЙ СРЕДЕ****Пономарев А.А.^{1,2}, Мулладжанов Р.И.^{1,2}, Дулин В.М.^{1,2}**¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследование фундаментальных процессов горения топлива при наличии дисперсной фазы особенно актуально для применения в практической области, связанных с созданием высокоэффективных силовых установок, таких как двигатели внутреннего сгорания или авиационные турбины. Хотя реалистичные системы включают в себя турбулентные потоки и полидисперсные частицы, фундаментальное понимание физических процессов может быть обеспечено изучением ламинарных пламен с монодисперсным распределением частиц.

В литературе имеется множество работ, посвященных изучению особенностей горения газообразных топлив в присутствии распыленной монодисперсной жидкой фазы на модели ламинарных пламен [1-5]. Впервые эффект увеличения скорости распространения пламени в присутствии капель по сравнению с горением газообразного топлива был экспериментально описан в работе Burgoyne [1]. Объяснение данного эффекта было предложено Hayashi [6], и заключалось в том, что горение в присутствии капель не соответствует режиму с полным коэффициентом избытка топлива $\varphi_t = \varphi_l + \varphi_g$, где φ_l и φ_g - коэффициенты избытка топлива жидкой и газовой фазы, соответственно. Оно происходит при некотором эффективном коэффициенте φ_{eff} , который оказывается ближе к стехиометрии, что увеличивает скорость распространения. При этом показана возможность горения спреев за пределами области воспламенения газа как для бедных ($\varphi < 0,4$), так и для богатых режимов ($\varphi > 4$). В некоторых работах [7] утверждается, что при наличии дисперсной фазы в области, где φ_t меньше стехиометрии, скорость распространения пламени может превосходить максимально возможную для горения чисто газового топлива.

Тем не менее, в литературе имеется очень мало данных посвященных численным расчетам ламинарным коническим пламенам газочапельных смесей [8]. В настоящей работе проведено трехмерное численное исследование особенностей горения ламинарного конического пламени газочапельной взвеси этанола на основе эксперимента.

Численный расчет горения газообразного этанола с добавлением капель на выходе из сопла с профилем Витошинского был проведен в 3D постановке. Расчетная область состояла из ~7 млн гексагональных ячеек. Значения, используемые в расчете, задавались в соответствии с экспериментом. Полный массовый расход спирта составил 2,1 г/мин (коэффициент избытка топлива $\varphi \sim 1,47$), из которых массовый расход газа — 1,6

г/мин и 0,5 г/мин в виде капель. Размер капель составил 14 мкм. Распределение по размерам задавалось монодисперсным.

Результаты, полученные методом численного моделирования, согласуются с экспериментальными данными. Подтверждено предположение о равновесной концентрации паров спирта внутри сопла. В данной работе показано увеличение скорости распространения пламени для режима с добавлением дисперсной фазы по сравнению с чисто газовым пламенем при одинаковых полных массовых расходах спирта. Для режима с чисто газовым пламенем скорость распространения ламинарного пламени составила 20 см/с, что соответствует литературным данным. Для режима с добавлением дисперсной среды скорость распространения ламинарного пламени составила 42 см/с, что значительно превосходит скорость горения чисто газообразного спирта при данном соотношении топлива к воздуху. При этом температура за фронтом пламени в обоих режимах соответствует значению для коэффициента избытка топлива 1,47 и составляет 2000К.

Список литературы:

1. Burgoyne J. H., Cohen L. The effect of drop size on flame propagation in liquid aerosols //Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences.1954. T.225. №. 1162. С. 375-392.
2. Browning J. A., Tyler T. L., Krall W. G. Effect of particle size on combustion of uniform suspensions //Industrial & Engineering Chemistry, 1957. T.49. №. 1. С. 142-147.
3. Ballal D. R., Lefebvre A. H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel droplets, fuel vapor and air //Symposium (International) on combustion. Elsevier, 1981. T.18. №. 1. С. 321-328.
4. Polymeropoulos C. E., Das S. The effect of droplet size on the burning velocity of kerosene-air sprays //Combustion and Flame. 1975. T. 25. С. 247-257.
5. Myers G. D., Lefebvre A. H. Flame propagation in heterogeneous mixtures of fuel drops and air //Combustion and Flame. 1986. T.66. №. 2. С. 193-210.
6. Hayashi S., Kumagai S., Sakai T. Propagation velocity and structure of flames in droplet-vapor-air mixtures //Combustion Science and Technology. 1977. T.15. №. 5-6. С. 169-177.
7. Neophytou A., Mastorakos E. Simulations of laminar flame propagation in droplet mists // Combustion and Flame. 2009. T.156. №. 8. С. 1627-1640.
8. Pera C., Reveillon J. Direct numerical simulation of spray flame/acoustic interactions // Proceedings of the Combustion Institute. 2007. V.31. no. 2. P. 2283–2290.

*Работа выполнена в рамках
государственного задания ИТ СО РАН*

УДК 536.468

**ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ СМЕСЕВЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ
НА ОСНОВЕ СВЕТЛЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ****Романов Д.С., Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Стрижак П.А.**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Доступность топливных ресурсов является одной из важнейших проблем современного мира. Согласно статистическим данным и экспертной аналитике, уголь, нефть и газ обеспечивают совокупно не менее 80% мирового энергопотребления [1]. При этом за счет специфики промышленного производства, энергетического и транспортного секторов потребность в жидких топливах особенно высока. В частности, доля нефти и нефтепродуктов в структуре мирового энергопотребления преобладает над другими источниками и составляет около 32% [1]. Актуальными научно-техническими задачами являются диверсификация базы жидких топлив и более широкое энергетическое использование растительного сырья и отходов.

Целью настоящего исследования являлось определение основных характеристик зажигания и горения жидких топлив, включая выбросы оксидов углерода. В качестве топлив использовались нефтяное дизельное топливо, а также дистиллированное талловое масло. Сырое талловое масло является основным побочным продуктом производства целлюлозы с использованием древесины хвойных пород деревьев [2]. Сырое талловое масло является недорогим сырьем для производства биотоплив, что делает его применение экономически и экологически оправданным. Смеси готовились на основе дизельного топлива с талловым маслом с массовой долей 5–15%.

Экспериментальная методика предполагала сжигание чистых и смесевых топлив в виде одиночных капель с начальным средним размером 2 мм в лабораторной печи при температуре 500–650 °С. Методика эксперимента, характеристики оборудования и процедуры обработки результатов аналогичны используемым в [3]. Смесевые топлива подготавливались с использованием магнитной мешалки AIBOTE ZNCLBS-2500 в течение 2–3 мин при скорости вращения магнитного якоря 1500 об/мин. Эксперименты по регистрации газоанализатором концентраций оксидов углерода проводились при сжигании образца топлива массой 0.01 ± 0.0001 г.

При сравнении концентраций оксидов углерода, полученных при сжигании исследуемых топлив в камере сгорания при температуре 500 °С, установлено, что добавка дистиллированного таллового масла с массовой долей 5% значительно снижает содержание CO_2 и CO в составе дымовых газов, по сравнению с исходным дизельным топливом (на 60% и 38% соответственно). При этом дальнейшее увеличение содержания таллового масла приводит к росту concentra-

ций оксидов углерода в дымовых газах. При доле добавки 15% содержание углекислого и угарного газов в составе продуктов сгорания было сопоставимым с дизельным топливом. В свою очередь, сжигание дизельного топлива без добавок характеризуется наименьшим уровнем оксидов углерода в составе дымового газа. Установлено, что добавка дистиллированного таллового масла позволяет повысить степень выгорания топлива по сравнению с дизельным топливом. Также установлено, что соотношение CO_2/CO снижалось с ростом температуры в камере сгорания для смесей с долей таллового масла 10% и 15%. По абсолютным средним значениям концентрации углекислого и угарного газов не превышали 1.62% и 1.16% соответственно.

Для капель топлив без добавок регистрировалось наибольшее время задержки зажигания. При 500 °С эта характеристика составила около 8 с как для таллового масла, так и для дизельного топлива. Время задержки зажигания дизельного топлива существенно снижалось (в 1.6 раз) при добавлении 5% таллового масла. При этом дальнейшее увеличение концентрации добавки не оказало существенного влияния на инерционность зажигания капель топливной смеси. Рост температуры в камере от 500 до 650 °С интенсифицировало испарение и воспламенение в 5.3 и 2.8 раз для капель таллового масла и дизельного топлива, соответственно, и в 2.5 раз для капель всех смесевых топлив.

В настоящей работе определены диапазоны параметров, соответствующие зажиганию и горению смесевых топлив на основе светлых углеводородов. Результаты исследования могут быть полезны для расширения топливной базы и развития технологий экологичной утилизации соответствующих топливных смесей в различных установках.

Список литературы:

1. Key World Energy Statistics 2020. Paris: IEA, 2020. 81 p.
2. Keskin A., Gürü M., Altıparmak D. Influence of tall oil biodiesel with Mg and Mo based fuel additives on diesel engine performance and emission // Bioresour. Technol. 2008. V. 99. P. 6434-6438.
3. Nyashina G., Vershinina K., Strizhak P. Impact of micro-explosive atomization of fuel droplets on relative performance indicators of their combustion // Fuel Proces. Technol. 2020. Vol. 201. Article number 106334.

Исследование поддержано грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение №075-15-2020-806 (договор №13.1902.21.0014)

УДК 536.46

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАМЕНИ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ПЛОСКОЙ ОХЛАЖДЕННОЙ ПРЕГРАДОЙ С УЧЕТОМ ДЕТАЛЬНОЙ КИНЕТИКИСластная Д.А.¹, Хребтов М.Ю.^{1,2}, Мулляджанов Р.И.^{1,2}, Дулин В.М.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова 1

Структура пламени, направленного на преграду, представляет значительный исследовательский интерес ввиду реализации таких импактных пламен в широком спектре практических применений: при нагреве и плавлении, обработке поверхностей, синтезе материалов. Наличие стенки существенно влияет на структуру пламени, стабилизацию, вызывает гашение, что приводит к неполному сгоранию топлива и как результат первичному образованию загрязнителей. В свою очередь неравномерный тепловой поток от пламени приводит к сложностям терморегулирования и раннему износу материала стенки [1]. Таким образом, детальное понимание подпроцессов взаимодействия пламени и стенки, изучение особенностей химического реагирования и теплообмена в пристенной области является важным для повышения эффективности установок и снижения количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Прямое численное моделирование является важным инструментом изучения импактных пламен, позволяющим проанализировать взаимодействие реагирующей струи с преградой, не прибегая к дополнительным физическим приближениям. Основной трудностью численного исследования оказывается учет химической кинетики, использование подробных механизмов реакции накладывает большие ограничения на потребляемую мощность и время расчета. Для уменьшения времени вычислений часто используют сокращенные кинетические механизмы или же методы табулированной химии. Но использование данных подходов не позволяет в полной степени проанализировать многие промежуточные компоненты реакции, играющие важную роль в процессах теплообмена и формирования канцерогенных веществ.

Работа посвящена прямому численному моделированию ламинарного импактного пламени предварительно перемешанной метановоздушной смеси вблизи холодной поверхности с использованием детальных кинетических механизмов. Струя смеси с коэффициентом избытка топлива $\phi = 0,92$ поступает из осесимметричного сужающегося сопла Витошинского выходным диаметром 15 мм при числе Рейнольдса $Re = 1000$. Преградой является плоская поверхность постоянной температуры 371 К, расстояние до которой от кромки сопла также 15 мм. Расчетная область представляет собой сектор цилиндра высотой 65 мм, радиусом 100 мм и углом раствора 5° (предполагается осевая симметрия течения). Вычислительная сетка состояла из 2×10^5 четырехугольных ячеек, минимальное разрешение 5 мкм.

В качестве основного инструмента моделирования был использован расчетный пакет laminarSMOKE [2],

построенный на основе открытого вычислительного кода OpenFOAM. Основным преимуществом данного модуля является возможность учета детальной химической кинетики, путем введения оператора разделения Стренга для корректного разрешения членов переноса и реакции в уравнениях на массовые доли и температуру. Уравнения набора элементарных реакций, собранных в единый кинетический механизм, задавался как внешний файл с описанием реакций в формате CHEMKIN. Выбранный кинетический механизм GRI-MECH 3.0 включал в себя 53 химических соединений и 324 элементарных реакций. Вычисления проводились в нестационарной постановке с учетом сил плавучести.

В работе исследована структура пламени при наличии охлажденной поверхности вблизи сопла. Изучено поведение потока реагирующей смеси в пристенной области. Проведено сравнение поля температуры с экспериментальными данными, полученными в ИТ СО РАН методом плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции [3]. Результат представлен на рис. 1: пламя имеет форму подобную полученной в эксперименте. Однако, наблюдаются небольшие отличия в значениях температуры пламени, что требует сравнение поля скорости в расчете и эксперименте для сопоставления конвективного теплообмена.

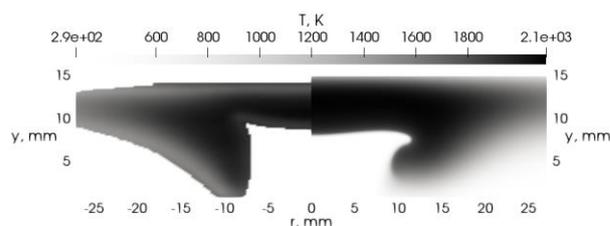


Рис. 1. Сравнение полей температуры импактного пламени, полученных в эксперименте (слева) и на основе численного моделирования (справа)

Список литературы:

1. Dreizler A., Böhm B. Advanced laser diagnostics for an improved understanding of premixed flame-wall interactions // Proceedings of the Combustion Institute. 2015. Т. 35. №. 1. С. 37-64.
2. Cuoci, Alberto, et al. Numerical modeling of laminar flames with detailed kinetics based on the operator-splitting method. Energy & fuels 27.12 2013. P. 7730-77537.
3. Tolstoguzov R.V., Chikishev L.M. Temperature field measurements between a Bunsen flame and flat a cold plate by using PLIF // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022. Т. 2233. №. 1. С. 012014.

Работа выполнена в рамках государственного задания в ИТ СО РАН

УДК 532.525.5

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАКЕЛА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ДВУХ СТРУЙ ВОДОРОДА

Тамбовцев А.С., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А., Литвиненко М.В., Шмаков А. Г.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская 4/1,

Развитие струйных течений связано с возникновением различных типов гидродинамической неустойчивости. Для струй, сформированных в каналах с малым удлинением характерно развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца варикозного или синусоидального типа с ранней турбулизацией. Для струй, сформированных каналами с большим удлинением, такая неустойчивость не реализуется, и струя имеет протяженный ламинарный участок. Сценарии диффузионного горения микроструи водорода, истекающей из удлиненной цилиндрической трубки в затопленное пространство описаны в [1]. Они схожи для микроструи истекающей из сопел с внутренними диаметрами в диапазоне 200 – 500 мкм: 1) горение чисто ламинарной микроструи с наличием ламинарного пламени большой дальности; 2) формирование двузонной структуры пламени: область ламинарного пламени сферической формы, охватывающей срез сопла, и турбулентного пламени далее по потоку; 3) прекращение горения турбулентного участка пламени при сохранении горения в ламинарном; 5) прекращение горения микроструи. При воспламенении на расстоянии от среза сопла развитие сценариев происходит по другому пути. Диапазон скоростей, в которых поддерживается горение с приподнятым над срезом сопла факелом существенно уже.

Выявленные особенности микроструи проявляются и при реализации соударяющихся струй. Использование соударяющихся струй позволяет управлять скоростными параметрами результирующей струи [2, 3], формировать форму факела и тем самым увеличивать полноту сгорания топлива. Особенность данных исследований состоит в том, что оси симметрии соударяющихся струй расположены под острым углом друг к другу, а поперечное положение сопел изменяется от полного перекрытия струй, когда оси симметрии находятся в одной плоскости, до полного расхождения струй, когда сопла разведены в поперечном направлении.

Цель данного экспериментального исследования состоит в определении структуры результирующей газовой струи при столкновении двух струй водорода в процессе диффузионного горения.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Сжатый водород из баллона (1) подается на клапан расходомера (2), который регулируется контроллером (3). Далее трасса с водородом раздваивается, каждая выходит на сопло (4), представляющее собой вытянутую цилиндрическую тонкостенную трубку. В экспериментах использовались пары сопел с внутренними диаметрами 200 мкм. Сопла располагались под углом друг к другу. Скорость истечения микроструи определялась по формуле $U=Q/S$, где Q – объемный расход газа, S – площадь поперечного сечения сопла. Скорость истечения из пары микросопел

устанавливалась одинаковая $U=U_1=U_2$. Воспламенение микроструи производилось как вблизи среза микросопла, так на расстоянии от него для реализации режима горения с факелом, приподнятым над срезом сопла. Процесс диффузионного горения визуализировался при помощи тепловизора.

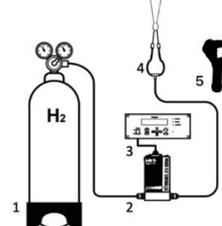


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – баллон со сжатым водородом, 2 – клапан расходомера MKS 1179B (MKS Instruments), 3 – 2- каналный контроллер расходомера MKS PR4000B (MKS Instruments), 4 – пара сопел $d_1=d_2 = 200$ мкм, 5 – тепловизор CEM DT-9897H.

На рис. 2 показаны теневые картины и картины снятые тепловизором. Рис. 2 (а, б) взаимодействие факелов, сидящих на срезе сопла, рис. 2 (в, г) факелов, приподнятых над срезом сопла.

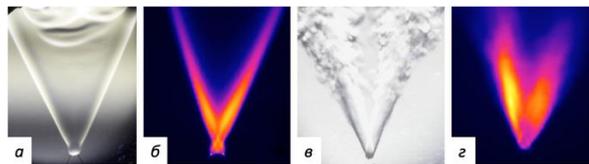


Рис. 2. Взаимодействие двух факелов при истечении микроструи водорода из сопел с $d_1=d_2 = 200$ мкм, а), б): $U_1 = U_2 = U = 457$ м/с ($Re=932$); в), г): $U_1=U_2=U = 914$ м/с ($Re = 1865$).

В результате получены характерные сценарии горения сталкивающихся микроструи водорода при диффузионном горении в случае факелов присоединенных и приподнятых над срезом сопла.

Список литературы:

1. Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А. Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение: Учеб. Пособие. 2-е изд., перераб. и доп.//Новосиб. Гос. Ун-т. Новосибирск, 2013. 240 с.
2. Laurendeau E., Jordan P., Bonnet J. P., Delville J., Parnaudeau P., and Lamballais E. Subsonic jet noise reduction by fluidic control: The interaction region and the global effect // Phys. Fluids. 2008. V. 20. P. 101519.
3. Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю., Худяков П.Ю. Особенности изменения термической структуры газовых компактных струй // Изв. РАН. МЖГ. 2013. № 2. С. 104–111.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта российского научного фонда (Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 22-19-00151, <https://rscf.ru/project/22-19-00151/>)

УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ БУНЗЕНА В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Толстогузов Р.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Обеспечение стабилизации пламени в горелочных устройствах является актуальной задачей, решаемой, как правило, с организацией локальных зон рециркуляции (или застойных зон). Однако в таких условиях может возникать локальный перегрев элементов горелочного устройства. Также возникновение больших зон рециркуляции приводит к повышенным гидравлическим потерям в тракте горелочного устройства. Более того, при сжигании смесей со значительным избытком воздуха, являющимся в настоящее время основной технологией снижения вредных выбросов (NO_x , сажи) в камерах сгорания, следует избегать больших зон рециркуляции, где продукты горения имеют большое время пребывания. Поэтому актуальной задачей является развитие альтернативных методов стабилизации пламени в камерах сгорания.

В частности, организация горения в электрическом поле может быть использована для повышения устойчивости пламени [1, 2]. Выделяют различные физические и химические механизмы влияния электрического поля на пламя. Достаточно сильные электрические поля (более ≈ 100 В/м при атмосферном давлении) влияют на химический состав горения, ускоряя электроны до энергий, способных возбуждать, диссоциировать или ионизировать нейтральные частицы при столкновении [2]. Даже поля, которые слишком слабы, чтобы непосредственно влиять на горение, могут вызывать значительные гидродинамические потоки – так называемые электрические или ионные ветры [3] – за счет передачи импульса от ускоренных заряженных частиц нейтральному газу [4]. Если в большинстве работ авторы сходятся во мнении, что электрическое поле значительно влияет на скорость распространения пламени, то данных об изменении распределения температуры в литературе практически отсутствуют.

Цель данной работы заключалась в исследовании влияния постоянного электрического поля на ламинарное пламя предварительно перемешанной смеси в форме конуса. Акцент в работе сделан на количественной оценке распределения температуры при отсутствии и при наличии электрического поля.

Экспериментальная установка состояла из осесимметричного сужающегося сопла с внутренним диаметром равным $d = 15$ мм. Часть сопла была выполнена из диэлектрического материала для гальванической развязки сопла-земля. В сопло производилась подача предварительно-перемешанной смеси горючего газа (метана) и воздуха. Число Рейнольдса были равны $Re = 1000$ и 1300 , коэффициент избытка топлива был равен $\Phi = 0,92$. Контроль расходов компонентов смеси регулировался массовыми расходомерами Bronkhorst El-Flow. Вблизи кромок сопла были установлены две параллельные металлические пластины,

между которых было организовано постоянное электрическое поле с максимальной напряженностью $E = 62,5$ кВ/м при помощи высоковольтного источника питания. Расстояние между электродами варьировалось от 40 мм до 70 мм с постоянным напряжением $U = 2,5$ кВ, подаваемым на пластины.

Для реализации метода лазерно-индуцированной флуоресценции использовался импульсный лазер накачки Nd:YAG QuantaRay (532 нм), перестраиваемый импульсный лазер на красителе Sirah Precision Scan. С помощью лазера на красителях происходило возбуждение флуоресценции молекул ОН на длине волны перехода $Q_1(5)$ (282.66 нм) полосы (1–0) электронной системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$. Лазерный луч разворачивался в лазерный нож с использованием коллимирующей оптики (LaVision) и освещал центральное сечение исследуемого потока. Энергия лазерного импульса составляла приблизительно 10 мДж до коллимирующей оптики. Регистрация сигнала флуоресценции производилась с помощью интенсифицированной КМОП камеры LaVision Imager sCMOS, подключённой к усилителю на основе ЭОП LaVision IRO, на усилитель камеры был установлен УФ-объектив и полосовой фильтр (310 ± 10 нм), позволяющий исключить влияние собственного свечения пламени и выделить необходимый участок длин волн спектра флуоресценции радикала ОН.

В результате экспериментального исследования структуры пламени предварительно-перемешанной метано-воздушной смеси проведена визуализация режимов горения пламени под действием постоянного электрического поля и без него, получен сигнал флуоресценции радикала ОН в пламени при наличии поля и без него. Было выявлено, что наличие электрического поля приводит к изменению формы фронта пламени и его отклонению к одному из электродов. На основе изображений флуоресценции получены количественные данные о влиянии электрического поля на распределение температуры.

Список литературы:

1. Payne K. G., Weinberg F. J. A preliminary investigation of field-induced ion movement in flame gases and its applications // Proc. R. Soc. London Ser. A. 1959. V. 250, № 316.
2. Starikovskaia S. M. Plasma assisted ignition and combustion // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. № R265.
3. Robinson M. A History of the Electric Wind // Am. J. Phys. 1962. V. 30. № 366.
4. Lawton J., Weinberg F. J. Maximum ion currents from flames and the maximum practical effects of applied electric fields // Proc. R. Soc. London Ser. A. 1964. V. 277. № 468.

Работа выполнена за счет средств государственного задания в ИТ СО РАН

УДК 536.46

ГОМОГЕННОЕ ГОРЕНИЕ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В СЛАБОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Тупикин А.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Метан, в настоящее время является наиболее распространенным и востребованным энергоносителем. Природный газ, который содержит 82-98% метана, занимает среди энергоисточников третье место (после нефти и угля), и покрывает 23% мирового энергетического спроса. Управление сжиганием углеводородов с помощью внешнего электрического поля является одним из способов повышения энергоэффективности и экологической безопасности при выработке энергии за счет сжигания углеводородных топлив.

В зависимости от гидродинамических условий и напряженности электрического поля возможны три основных механизма влияния на горение: нагрев при протекании тока через область реакций; воздействие на кинетику и ионный ветер. Слабому электрическому полю соответствует условие $(E[\text{В/см}]/P[\text{тор}] < 2)$. В этом случае изменениями в кинетике химических реакций и омическим нагревом можно пренебречь. И хотя механизм вовлечения ионами нейтральных частиц в дрейф (ионный ветер) выглядит достаточно просто, остаются неразрешенные вопросы о том, каким именно образом происходит воздействие электрического поля на распространение пламени, стабилизацию и срыв горения.

При воздействии внешним электрическим полем на пламя важным фактором является режим горения. Так в случае ламинарного гомогенного метано-воздушного пламени с ростом напряженности поля величина нормальной составляющей скорости течения к фронту горения ограничена и отличается не более чем на 10% от ее значения без воздействия. А в турбулентном режиме отклонение от невозмущенного состояния нарастает нелинейно вплоть до реализации электрического пробоя среды (см. рис.1). При импульсно-периодическом воздействии электрическим полем на горение метана наблюдаются режимы с сильными пульсациями фронта горения ($Re \approx 2500$). При этом число Струхала $Sh=0.35$ соответствует условиям развития газодинамической неустойчивости при струйном истечении [1]. Т.е. воздействие электрических сил на область реакций создает резонансный отклик в пульсациях скорости потока.

В работе [2] сформулирована гипотеза о локализации воздействия электрического поля на области горения и показано, что под действием электрических сил фронт ламинарного пропано-воздушного пламени деформируется, и меняется степень его растяжения. Следует отметить, что для метана были получены аналогичные результаты, при этом эффект более выражен, чем в случае пропана. При стабилизации горения на отрывной зоне за центральным телом изменение критерия Климова составляет порядка 15% для пропана и превышает 20% для метана.

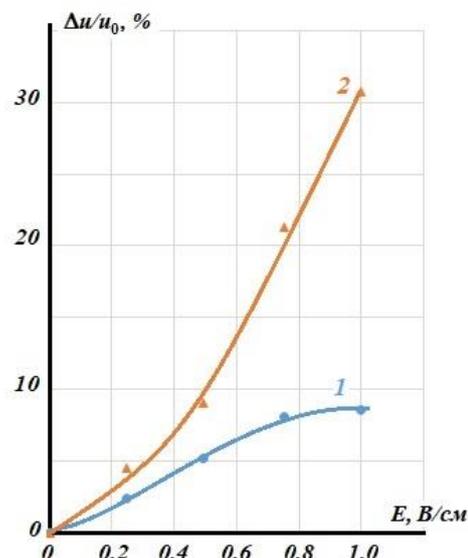


Рис. 1. Изменение нормальной к фронту горения компоненты скорости от напряженности поля: 1 – ламинарный и 2 – турбулентный режим.

Оставаясь в рамках гипотезы о влиянии электрического поля на тепломассоперенос вблизи фронта горения, можно предположить, что будет меняться коэффициент турбулентного обмена. Увеличение потерь давления во фронте пламени пропорционально росту турбулентного обмена $\Delta p \sim \Delta D$, с одной стороны. С другой, считая процесс стационарным и принимая равенство электрических инерциальных сил,

$$\Delta p = \int_0^{z_F} en_+ E(z) dz : \langle E \rangle \quad (\langle E \rangle - \text{среднее значение}$$

напряженности поля). Получаем линейную связь между коэффициентом турбулентного обмена и параметрами электрического поля

Таким образом, в ламинарных метано-воздушных пламенах под действием электрического поля происходит изменение коэффициента растяжения пламени (критерия Климова). Величина эффекта ограничена, т.к. критерий Климова принимает значение 0 в случае плоского нерастянутого пламени и не может стать отрицательным. В турбулентном режиме горения воздействие поля на пламя ведет к изменению коэффициента турбулентного обмена. В этом случае ограниченный по интенсификации процессов нет.

Список литературы:

1. Отрывные течения. / Чжен П. Москва. «Мир». 1973.
2. Тупикин А.В., Замашиков В.В. Растяжение ламинарного пламени в слабом электрическом поле // Физика горения и взрыва. 2020. Т.56, №.2. С. 3-9.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ гос.рег. 122041400020-6)

УДК 536.46

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАЗМОЙ ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ГОМОГЕННОГО ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ИСТЕЧЕНИИ В АТМОСФЕРУ

Тупикин А.В.¹, Третьяков П.К.²

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

²Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

В настоящее время активно изучаются возможности применения плазмы лазерного пробоя для воспламенения топливно-воздушных смесей и стабилизации горения с целью повышения эффективности и экологической безопасности при сжигании топлив. Следует заметить, что в вопросах инициирования горения наблюдается значительный прогресс. И если стабильное воспламенение реализуется даже при сверхзвуковых скоростях (см. [1,2]), то стабилизация пламени на плазме в потоках со скоростью выше 40 м/с без вспомогательных устройств практически не реализуется и мало изучена.

Проведено исследование стабилизации гомогенного водородно-воздушного пламени на плазме оптического разряда в высокоскоростном потоке. Истекающая в атмосферу струя водородно-воздушной смеси натекала на плазменное образование, которое являлось одновременно воспламенителем и стабилизирующим пламя фактором. В эксперименте реализовывались режимы со средней скоростью истечения смеси $u \approx 30 \div 200$ м/с ($Re \approx 3500 \div 30000$) при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 0.85 \div 2.5$. Для визуализации фронта горения применялся интерферометр сдвига. На каждом режиме проводилась серия снимков, по которым определялось среднее положение фронта горения (линии, отделяющей холодный поток от области горения и продуктов сгорания). За скорость распространения турбулентного пламени u_t (турбулентную скорость горения) принималась нормальная составляющая скорости потока к линии, соответствующей среднему положению фронта пламени. Проведено четыре серии опытов, в каждой расход водорода и параметры лазерного излучения поддерживались постоянными, а состав и скорость истечения смеси изменялись за счет варьирования расхода воздуха: 1 – $f=30$ кГц, $G^1_{H_2}=0,107$ г/с; 2 – $f=30$ кГц, $G^2_{H_2}=0,063$ г/с; 3 – $f=8$ кГц, $G^3_{H_2}=0,087$ г/с; 4 – $f=8$ кГц, $G^4_{H_2}=0,107$ г/с.

При анализе результатов в качестве отправной точки использована модель описания турбулентного пламени из [3], которая предсказывает линейный характер зависимости турбулентной скорости горения от критерия гомохронности. В нашем случае, при стабилизации пламени на следе за оптическим разрядом подобного не наблюдалось.

Были построены зависимости турбулентной скорости от числа Маха и коэффициента избытка воздуха. При этом зависимости турбулентной скорости от числа Маха $F_i(M) = u_t/u_L$, где i – номер серии опытов, а u_L – скорость распространения ламинарного пламени, носили квадратичный характер. Путем сдвига вдоль оси чисел Маха они объединялись в единую кривую. Зависимости от коэффициента избытка воздуха также

приводятся к единому распределению при учете величины расхода водорода, которому пропорционально количество тепла, выделяющегося при горении.

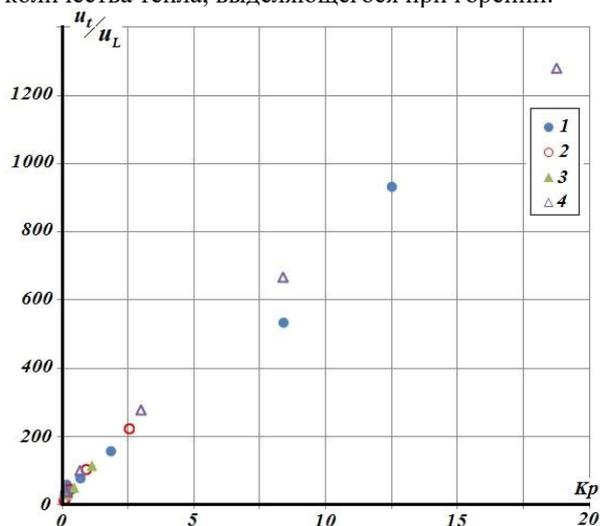


Рис. 1. Турбулентная скорость горения от безразмерного параметра: 1 – $f=30$ кГц, $G^1_{H_2}=0,107$ г/с; 2 – $f=30$ кГц, $G^2_{H_2}=0,063$ г/с; 3 – $f=8$ кГц, $G^3_{H_2}=0,087$ г/с; 4 – $f=8$ кГц, $G^4_{H_2}=0,107$ г/с.

Найден безразмерный критерий $Kp = \frac{u^2}{cu_L}$ (c – скорость звука),

связь которого с турбулентной скоростью горения $u_t/u_L = f(Kp)$, с хорошей точностью, можно считать линейной функцией (см. рис.1). Данный критерий можно интерпретировать, как отношение скоростного напора к интенсивности звуковой волны, бегущей из области протекания реакций.

Влияние на турбулентную скорость горения параметров лазерного излучения в пределах их варьирования от опыта к опыту было не значительным.

Список литературы:

1. Зудов В.Н., Третьяков П.К. Иницирование оптическим разрядом гомогенного горения топливовоздушной смеси в высокоскоростной струе // Физика горения и взрыва. 2017. Т.53, №3. С.1-9.
2. A. Shukla, J. Vaghasia, M. Mistry Effect of laser ignition on combustion and performance of internal combustion engine: A Review // Energ. Convers. Manage. 2022. V.13. p.100166.
3. В.К. Баев, П.К. Третьяков Расчет положения пламени в турбулентном потоке. // Известия СО АН СССР. 1969. №3. вып.1. С.32-37.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ госрегистрации 122041400020-6 и 121030500157-3)

УДК 544.452 543.637 546.171.1 547.495.2 62-642

ОКИСЛЕНИЕ КАРБАМИДА В ВОДОКИСЛОРОДНОМ ФЛЮИДЕ

Шишкин А.В., Алехин С.А., Сокол М.Я., Востриков А.А., Федяева О.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Ежедневное производство навоза животноводческими и птицеводческими предприятиями составляет 15 млн. тонн, однако только часть его может быть использована в сельском хозяйстве [1]. Большое количество азота поступает в окружающую среду с карбамидом ((NH₂)₂CO) в составе муниципальных стоков, стоков промышленных предприятий, а также в грунтовых водах из-за широкого использования карбамида в качестве удобрения. Производство карбамида в мире с 1960 по 2000 год увеличилось более чем в 100 раз [2]. Избыток азота в сточных водах является основной причиной загрязнения грунтовых и поверхностных вод, что представляет опасность для живых организмов [1]. Окисление обводнённых органических отходов в H₂O/O₂ флюиде рассматривается в качестве одного из перспективных методов их переработки [3]. Целью данной работы является выявление особенностей окисления карбамида в H₂O/O₂ флюиде при нагреве со скоростью 1 °С/мин до 600 °С и разработка способов интенсификации процесса.

При эндотермической реакции гидролиза карбамида образуются CO₂ и NH₃. Затем NH₃ окисляется в основном до N₂. Брутто-реакция окисления карбамида: (NH₂)₂CO^(g) + 1,5O₂ → N₂ + 2H₂O^(g) + CO₂, Δ_rH^o₂₉₈ = -642 кДж/моль. Эксперименты проведены по методике [4]. Условия и результаты опытов представлены в таблице.

Таблица 1. OR = nO₂/1,5n_{urea} – коэффициент избытка кислорода; α_N – доля азота, перешедшего в N₂; н.о. – не определялось.

№	Реагенты, ммоль				OR	α _N , %
	(NH ₂) ₂ CO	O ₂	H ₂ O	NaOH		
1	19,6	–	206	–	–	–
2	25,8	38,5	150	–	1,00	н.о.
3	19,3	28,8	156	–	1,00	н.о.
4	19,6	29,0	206	–	0,99	68
5	19,2	36,1	203	–	1,25	78
6	19,5	29,8	202	28,1	1,02	81

Термические эффекты, представленные на рис. 1а, связаны с горением NH₃ на поверхности внутренней платиновой-платиновой термопары (ППТ). На рис. 1б видно, что гидролиз карбамида начинается при T* ≈ 145 °С, и достигает максимума при ≈ 190 °С (в опытах 1–5, табл. 1). Это хорошо согласуется с данными [5]. Максимум в районе ≈ 300 °С отвечает началу перехода системы в однофазную область и одновременно 2-й стадии гидролиза карбамида [5].

За исключением опыта 5, где наблюдается значительный скачок ΔT, изменения давления и ΔT не связаны. Это означает, что окисление NH₃ в H₂O/O₂ флюиде в условиях данной работы протекает, прежде

всего, по механизмам гетерогенных реакций на поверхности ППТ и стенке реактора.

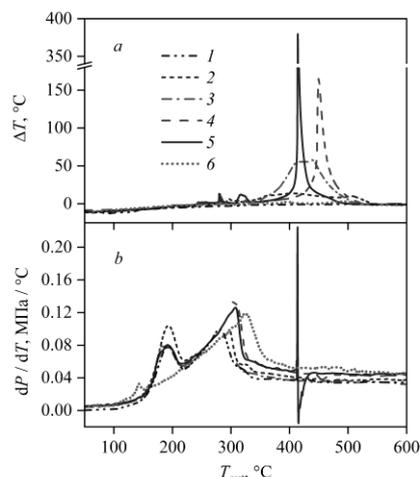


Рис. 1. Температурная зависимость разности показаний внутренней и внешней термопары ΔT = T_{in} – T_{out} (а) и производной давления по температуре (б) в опытах 1-6.

Сравнение полученных результатов показывает, что уменьшение исходного количества карбамида и увеличение количества воды ускоряет окисление NH₃. Наличие O₂ не влияет на гидролиз карбамида. Увеличение OR на 25% приводит к росту скорости и степени окисления NH₃. Добавление NaOH способствует снижению на 35 °С температуры начала гидролиза, связыванию CO₂ и NO_x, увеличению степени окисления NH₃ и снижению каталитической активности ППТ.

Список литературы:

1. Chávez-Fuentes J.J., Capobianco A., Barbušová J., Hutňan M. Manure from our agricultural animals: A quantitative and qualitative analysis focused on biogas production // Waste Biomass Valor. 2017. V. 8. P.1749–1757.
2. Glibert P.M, Harrison J., Heil C., Seitzinger S. Escalating worldwide use of urea—a global change contributing to coastal eutrophication // Biogeochemistry. 2006. V. 77. P. 441–463.
3. Fedyaeva O.N., Artamonov D.O., Vostrikov A.A. Oxidation of municipal sewage sludge, chicken and swine manure in the water-oxygen fluid flow under uniform heating // J. Supercrit. Fluids. 2022. V. 191. P. 105767.
4. Fedyaeva O.N., Shishkin A.V., Vostrikov A.A. Effect of the fuel equivalence ratio on the mechanisms of thiophene oxidation in water vapor at increased density of the reagents // ACS Omega. 2021. V. 6. P. 13134–13143.
5. Zhu N., Qian F., Xu X. et al. Thermogravimetric experiment of urea at constant temperatures // Materials. 2021. V. 14. P. 6190.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-19-20003
при финансовой поддержке
Правительства Новосибирской области № р-10.

СЕКЦИЯ 7

Теплофизические проблемы энергетики, энергоэффективность и энергосбережение

УДК 621.311.22

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОЧНОГО ГАЗИФИКАТОРА БИОМАССЫ**Абаимов Н.А., Рыжков А.Ф.**Уральский федеральный университет,
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Тематика поточной газификации биомассы начала очень активно развиваться в конце девяностых годов прошлого века, а первые публикации появились уже в нулевые годы [1], что в первую очередь связано с коммерческим успехом угольных газификаторов в девяностые годы прошлого века и последующим стремлением перейти от «грязного» угля к «чистой» биомассе. Несмотря на кажущуюся схожесть процессов поточной газификации угля и биомассы (и то и то является твердым органическим топливом) прямая замена оказалась невозможной по целому ряду причин. Основной из которых, является низкая теплота сгорания биомассы, ввиду низкого содержания в ней углерода (основного теплотворного элемента). Также проблемой является низкая способность сырой биомассы к мелкому помолу, что вызывает огромные затраты на приготовление пылевидного топлива из нее и вынуждает использовать относительно крупные частицы размером до 1 мм. Вышеописанные факторы серьезно снижают тепловые напряжения и повышают требуемое время пребывания частиц биомассы в установке, что вынуждает принципиально пересматривать конструкцию и режим работы установки.

Самым близким к коммерческой эксплуатации поточным газификатором неторрефицированной (сырой) биомассы является установка МНН, компании, разработавшей первый в мире коммерческий воздушный поточный газификатор угля. В газификаторе биомассы МНН проблема низких теплонапряжений решается путем замены воздушного дутья на парокислородное, не содержащее инертный азот. А проблема времени пребывания крупных частиц в газификаторе решена изменением его геометрии – нижняя часть имеет форму конуса, что обеспечивает высокую скорость газа в низу газификатора, которая не позволяет крупным частицам проваливаться на дно установки. При этом крупные частицы покидают нижнюю часть только после частичной конверсии и уменьшении своего размера, что и увеличивает их результирующее время пребывания в газификаторе. На пиролиз частиц требуется 4-8 секунд, что вынуждает создавать крутку пылегазового потока (в режиме прямого тока время пребывания легких частиц составляло бы менее секунды). Температурный режим работы газификатора находится в диапазоне 700-1000°C. Он подобран таким образом, чтобы с одной стороны температура (локально свыше 1000°C) была достаточна для протекания эндотермических реакций газификации и разложения углеводородов (смола и метана), а с другой стороны не превышала температуры спекания золы древесины (которая, например, у ели равняется 1110-1340°C) и не снижала хим КПД. Также данный диапазон решает проблему легковозгоняемых щелочных и щелочноземельных металлов, содержащихся в золе биомассы.

Низкотемпературные процессы (500-900°C), например газификаторы с плотным слоем, осложнены проблемой отложений этих металлов [2], что приводит к снижению эксплуатационных характеристик и даже к авариям. Такие металлы испаряются при температуре 1000-1100°C, которая достигается в частице благодаря окислительной атмосфере и протекающим экзотермическим реакциям окисления. Газификатор работает под атмосферным давлением.

Исследование проводилось с помощью метода вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) в программе OpenFOAM с использованием подмодели турбулентности $k-\omega$ SST. Расчеты выполнялись при холодной постановке задачи.

В ходе выполнения исследования получены следующие научные результаты:

- оценены режимные параметры работы газификатора и его конструктива;
- разработана CFD-модель аэродинамики холодной установки поточного типа;
- проведено CFD-моделирование процесса работы поточного газификатора биомассы с различной конфигурацией подачи в него сред и с различными режимными параметрами;
- проведена валидация разработанной CFD-модели аэродинамики холодной установки без подачи частиц биомассы и с подачей частиц биомассы;
- выработаны рекомендации по совершенствованию исследуемого варианта поточного газификатора биомассы.

Полученные результаты говорят о том, что гравитационная сепарация частиц требует правильно подобранных внутренних диаметров каждого из участков газификатора, а также строгого соблюдения режима подачи окислителя и частиц биомассы. Только соблюдение этих условий позволяет крупным (свежим) частицам оставаться в газификаторе достаточное время, а мелким (конвертированным) – покидать его.

Список литературы:

1. Mori R., Oki Y., Takeno K., Matsumoto K., Kobayashi Y., Ishii H. Production of Alternative Fuel Using Biomass Gasification Technology // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. 2008. V.45, No.1. P.67-69.
2. Deng L., Huang X., Tie Y., Jiang J., Zhang K., Ma S., Che D. Experimental study on transformation of alkali and alkaline earth metals during biomass gasification // Journal of the Energy Institute. 2022. V.103. P.117-127.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства "Приоритет-2030"

УДК 621.03

ПОСТТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПО КОДУ КОРСАР/ГП ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ПОТЕРИ ОХЛАЖДЕНИЯ БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Акименкова Е.Ю., Мойсин Д.Н., Степанов О.Е.

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»,

142103, Россия, Московская область, Подольск, Орджоникидзе, 21

В проектах АЭС предусмотрены бассейны выдержки (БВ) отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), в которых организуется долговременная выдержка топлива перед его отправкой на захоронение или переработку.

Проектирование систем охлаждения БВ выполняется исходя из максимально возможной загрузки БВ ОЯТ с необходимым запасом. Это обеспечивает безопасное хранение отработанного топлива на площадках АЭС для действующих и проектируемых блоков во всех проектных режимах работы, включая аварийные события, а также минимизацию последствий за проектных аварий.

В тоже время возможны события, относимые к за проектным авариям, при которых может быть потеряно охлаждение АЭС на недопустимо долгий период в совокупности с невозможностью своевременного обеспечения подпитки БВ даже аварийными системами, что создает предпосылки для перерастания подобных ситуаций в разряд радиационных и ядерно-опасных аварий. Сценарий, очень близкий к этому, имел место в 2011 г в Японии на АЭС «Фукусима-1» [1].

В случае потери охлаждения БВ скорость разогрева объема воды до температуры насыщения зависит от остаточного тепловыделения отработавшего топлива и объема воды. В случае развития аварийной ситуации выделяются следующие стадии [2]:

- стадия до оголения топлива (уменьшение уровня воды в БВ, вследствие её выкипания);

- стадия оголения топлива (разогрев оголенных частей ТВС зависит от остаточной мощности, интенсивности паро-циркониевой и паро-сталево-реакций, скорости генерации пара, теплообмена с паром и излучением);

- стадия разрушения топлива (в худшем варианте развития событий).

Согласно действующим нормативным документам РФ коды, используемые при обосновании безопасности АЭС, должны быть установленным образом верифицированы (валидированы) и аттестованы.

Вместе с тем спектр экспериментальных исследований, используемых в целях валидации отечественных и зарубежных теплогидравлических кодов (RELAP5, ATHLET, КОРСАР, MELCOR, СОКРАТ и др.) был направлен преимущественно на исследование процессов в первом контуре реакторных установок. Процессам, протекающим в аварийных режимах в БВ, до недавнего времени не уделялось должного внимания при верификации кодов. В частности, среди бенчмарков, используемых для валидации кода КОРСАР и СОКРАТ, условиям БВ близок лишь опыт 5002 на установке NEPTUN [3] и один из серии экспериментов на стенде ПСБ-ВВЭР. В том числе поэтому за

рубежом начали проводить экспериментальные исследования процессов при потере охлаждения БВ, например, можно выделить серию экспериментов на установках ADELA и ALADIN, выполненных в 2013-2018 гг в Дрезденском техническом университете [3-5]. Эти данные представляют несомненный интерес и должны быть использованы при валидации кодов, но и имеют ряд недостатков, в том числе в связи с направленностью на изучение процессов в зарубежных типах ТВС.

В ходе выполнения расчетов была проведена серия экспериментов на «Стенде повторного залива», модернизированного для исследований теплофизических явлений в условиях долговременной потери охлаждения БВ РУ с ВВЭР-1000/1200. Набрана необходимая повторяемость экспериментов и новые экспериментальные данные были использованы для постестовых расчетов наиболее прототипных опытов, результаты которых огибают основные моделируемые теплогидравлические процессы по исследованию охлаждения твэлов в БВ:

- выпаривание теплоносителя с последующим оголением и разогревом стержней при «низком» начальном уровне воды для суммарной мощности сборки 12 кВт и 2 кВт (около 100 и 20 Вт/стержень соответственно);

- «набухание» при разогреве и выброс теплоносителя при начале кипения при «высоком» начальном уровне для суммарной мощности сборки 12 кВт и 2 кВт (около 100 и 20 Вт/стержень соответственно).

Получено хорошее количественное совпадение результатов расчетов с опытными данными по выпариванию теплоносителя с последующим оголением и разогревом стержней при «низком» начальном уровне – как по моменту начала кипения, так и по моменту начала оголения (роста температуры) стержней, а также по максимальной температуре стержней.

Список литературы:

1. Study of Fukushima Daichi Nuclear Power Station Unit 4 Spent Fuel Pool. D. Wang et al. // Nuclear technology. Vol. 180. Nov. 2012.
2. Phenomena Identification and Ranking Table. Priorities for Loss-of-Cooling and Loss-of-Coolant Accidents in Spent Nuclear Fuel Pools. Nuclear Safety and Regulation. OECD 2018 NEA No. 7443.
3. Aksan N., Analytis G. Th. Boil-Off Experiments with the EIR_NEP-TUN Facility: Analysis and Code Assessment Overview Report. NUREG/IA-0040, EIR-Bericht Nr.629, NRC, 1992.
4. C. Partmann, C. Schuster, A. Hurtado. Experimental investigation of the thermal hydraulics of a spent fuel pool under loss of active heat removal conditions // Nuclear Engineering and Design. 2018. 330. pp. 480–487.
5. M. Arlit, C. Partmann, E. Schleicher, C. Schuster, A. Hurtado, U. Hampel. Instrumentation for experiments on a fuel element mock-up for the study of thermal hydraulics for loss of cooling or coolant scenarios in spent fuel pools // Nuclear Engineering and Design 2018. 336. pp.105–111.

УДК 621.03

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПО ВЫБОРУ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ КОНТУРА ЦИРКУЛЯЦИИ И ПАРОГЕНЕРАТОРА НОВОГО ВОДО-ВОДЯНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО РЕАКТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ ВВЭР-И

Бедретдинов М.М., Быков М.А., Следков Р.М., Степанов О.Е.

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»,
142103, Россия, Московская область, Подольск, Орджоникидзе, 21

Востребованность малых АЭС в настоящее время возрастает огромными темпами. Интерес к атомным станциям малой мощности растет не только в России, но и в мире. Потенциальных областей их использования много, для нашей страны это в первую очередь надежное энергообеспечение отдаленных территорий. У каждого проекта атомной станции малой мощности есть свои привлекательные особенности.

В связи с нарастающей мировой потребностью в АЭС малой мощности, в 2022 году в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» проведены исследования и предварительные конструкторские разработки технического предложения интегральной РУ ВВЭР-И. В частности, проводились расчетные исследования теплогидравлики первого и второго контура РУ.

Цель данных расчетных исследований состояла в разработке оптимальной конструкции интегральной реакторной установки (ПГ расположен в корпусе РУ) и определении основных геометрических характеристик контура естественной циркуляции для обеспечения отвода требуемой мощности от активной зоны РУ при минимальных массогабаритных характеристиках.

В ходе расчетных исследований определялась наиболее эффективная конструкция ПГ, оценивались гидравлические сопротивления активной зоны, ПГ и ВКУ, на основе которых определялась высота контура естественной циркуляции, проводилось обоснование надежного охлаждения активной зоны в стационарном режиме эксплуатации.

В ходе расчетов учитывались также критерии по предельным размерам, обеспечивающие транспортабельность реактора в сборе и по теплогидравлическим параметрам в активной зоне, не превышающих значений, для которых накоплен многолетний положительный опыт эксплуатации реакторов ВВЭР.

Выбор в пользу основных неизменных исходных данных был сделан в том числе исходя из рекомендаций, приведенных в [1]. Такие параметры как тип ПГ, геометрические параметры и скорость теплоносителя в трубном пучке ПГ, компоновка активной зоны, подогрев теплоносителя в активной зоне, варьировались в ходе настоящих исследований. Варьирование этих параметров выполнялось с целью оптимизации высоты контура циркуляции теплоносителя и металлоемкости реакторной установки. Масса реактора определялась как суммарная масса корпуса реактора и теплообменной поверхности ПГ.

Расчеты проводились с использованием инженерной методики по выбору основных размеров на основе равенства движущего напора естественной циркуляции и суммарного гидравлического сопротивления контура циркуляции с использованием замыкающих

соотношений по теплообмену и гидравлическим сопротивлениям из [2 - 6]. Для визуализации результатов расчетов и кроссверификации инженерной методики для одного из вариантов конструкции была разработана и применена упрощенная CFD-модель контура циркуляции, параметры которой были предварительно верифицированы на бенчмарках задач с естественной конвекцией. Для обоснования надежности охлаждения ТВС активной зоны в стационарном режиме эксплуатации использовался аттестованный код ТИГР СК и таблицы критических тепловых потоков МАГАТЭ.

Результаты расчета с использованием инженерной методики по выбору и оптимизации основных параметров на основе равенства движущего напора суммарному гидравлическому сопротивлению РУ с достаточной точностью соотносятся с результатами расчетов по трехмерному CFD коду по температуре на входе/выходе активной зоны, а также скорости теплоносителя в активной зоне. Таким образом независимым расчетом подтверждена стабильность циркуляции теплоносителя по первому контуру.

По итогу исследований получены следующие результаты:

Выполнено сравнение нескольких типов ПГ и выбран U-образный вертикальный ПГ с движением теплоносителя в межтрубном пространстве.

Определены оптимальные параметры теплообменной поверхности ПГ.

Проведено сравнение влияния нескольких компонентов активных зон на массогабаритные характеристики и размеры контура циркуляции РУ.

Определена оптимальная величина подогрева теплоносителя в активной зоне реакторной установки.

Обоснована надежность охлаждения активной зоны и оценен запас до кризиса теплообмена, даны рекомендации по конструкции тяговых труб для обеспечения некипящего режима циркуляции в самой напряженной ТВС.

Список литературы:

1. Соловьев С.Л. Большие задачи по малым АЭС. Ежемесячный журнал атомной энергетики России # 3, 2021, стр. 26-31.
2. Б.А. Дементьев, Ю.Б. Воробьев, Б.А. Ионов. «Теплогидравлический расчет на ЭВМ реакторов типа ВВЭР и PWR» Москва: Издательство МЭИ, 1990.
3. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам: Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы. Москва: Энергоатомиздат, 1990.
4. Рассохин Н.Г. «Парогенераторные установки атомных электростанций» 3-е изд. Москва: Энергоатомиздат, 1987.
5. Григорьев В.А., Зорин В.М., Справочник «Тепловые и атомные электрические станции». Москва: Энергоатомиздат, 1989.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва, Машиностроение, 1975.

УДК 536.2

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ ВОЗДУХООБМЕНА ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ НА ТЕПЛОВИЙ И ДИФФУЗИОННЫЙ РЕЖИМ В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ

Борисов Б.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А., Салагаев С.О., Салихов Ф.Ю.

ФГАОУ ВО НИ ТПУ ТПУ Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, проспект Ленина, д.30

Использование газовых инфракрасных излучателей (ГИИ) имеет ряд преимуществ относительно традиционных систем отопления за счет возможности создания локальных тепловых зон в крупногабаритных производственных помещениях [1]. Создание таких зон наиболее целесообразно с помощью ГИИ светлого типа с более высокой мощностью по сравнению с ГИИ темного типа, которая достигается за счет открытого горения газа, что приводит к выбросам продуктов сгорания (в основном CO_2 , H_2O) в окружающую среду. В связи с этим, при использовании ГИИ такого типа необходима работа систем воздухообмена.

При создании тепловых зон для работающего целесообразно создавать регламентные тепловые условия (микроклимат) [2]. Для их обеспечения необходимо поддерживать в заданных пределах совокупность таких параметров как температура, скорость перемещения и состав воздуха. Согласно [2] в составе воздуха для помещений, в которых находятся люди среднесуточное значение концентрации CO_2 не должно превышать 5000 ppm.

Целью работы является оценка влияния работы системы воздухообмена на тепловой и диффузионный режим локальной рабочей зоны при использовании ГИИ светлого типа.

Математическое моделирование конвективно-кондуктивного переноса теплоты в области решения задачи проведено с использованием пакета COMSOL Multiphysics – модули «The Heat Transfer in Fluids Interface», «The Turbulent Flow, k-ε Interface», переноса CO_2 – модуль «Transport of Concentrated Species». Параметры радиационного теплового потока вычислялись в модуле «Surface-to-Surface Radiation» в рамках зонной модели с учетом средних угловых коэффициентов [3].

Задача решена в плоской постановке для области, схематично представленной на рис. 1.

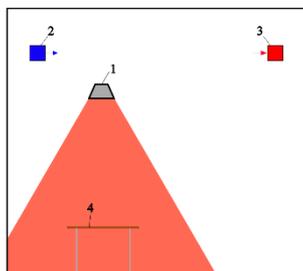


Рис. 1. Схема области решения (1 – ГИИ, 2, 3 – области приток и оттока воздуха, соответственно, 4 – горизонтальная панель (имитирующая оборудование).

Исходные данные: начальная температура в помещении 7°C ; температура нагретой поверхности ГИИ 800°C ; температура на входе приточной вентиляции

7°C ; расход воздуха на входе приточной вентиляции $2,22 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$

Анализ полученных результатов показывает, что квазистационарная гидродинамическая картина течения устанавливается примерно к 60 минуте от начала работы ГИИ (Рис. 2).

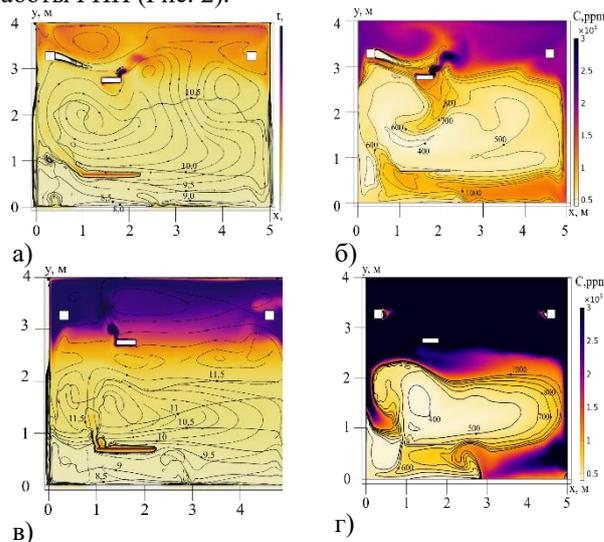


Рис. 2. Линии тока, поля температур (а,в) и концентраций (б,г), установившиеся к 60 минуте работы ГИИ: без работы системы воздухообмена (в,г); при работающей системе воздухообмена (а,б).

За 60 минут работы ГИИ без работы системы воздухообмена концентрация CO_2 почти во всей области находится в диапазоне от 3000-4000 ppm. Работа системы воздухообмена приводит к понижению концентрации углекислого газа до 400-1200 в рабочей зоне. При этом понижение температуры в этой области незначительно (не более 1°C).

На основании анализа полученных результатов можно сделать вывод, что варьируя параметры работы системы воздухообмена совместно с ГИИ можно понижать концентрацию CO_2 без существенного изменения температуры в локальной рабочей зоне.

Список литературы:

1. Maksimov V.I., Nagornova T.A., Kurilenko N.I., Voloshko I.V. Heat transfer under conditions of operation of a gas infrared emitter and an air exchange system // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. 2021. Vol. 332. № 9. P. 128-141.
2. Russell, J. Comsol Multiphysics / J. Russell, R. Cohn. – Scotland, United Kingdom: Lennex Corp, 2012. 79 p.
3. ГОСТ Р 59972-2021 Системы вентиляции и кондиционирования воздуха общественных зданий.

Работа поддержана РФФ
(грант № 20-19-00226 П)

УДК 532.54

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНДИЦИОНЕРА ПОТОКА СО ЗВУКООТРАЖАЮЩИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ**Валеев А.А., Душин Н.С., Душина О.А.**Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»,
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

Сложная пространственная конфигурация трубопроводных систем, наличие регулирующих устройств и задвижек на трубопроводах и газораспределительных станциях нарушает однородность и симметрию профиля скорости, вызывает закрутку течения и создает условия для генерации и усиления акустического шума. Появление этих факторов негативно сказывается на точности измерения расхода газа.

Наиболее рациональным способом снижения неопределенности измерений является использование устройств подготовки потока (кондиционеров потока), формирующих течение с известными характеристиками. Однако существующие модели кондиционеров потока в основном разработаны для борьбы с ограниченным набором гидродинамических предисторий течения и, как правило, требуют совместной градуировки с конкретным расходомером. Кондиционеры потока, работающие в широком спектре предисторий течения и способные снижать влияние акустики на точность измерений, практически не разрабатывались. Для решения этих проблем нами предложен кондиционер потока новой конструкции. Его особенностью является использование картриджа с набором соосных продольных перфорированных цилиндров, расположенных друг в друге с переменным шагом по диаметру. Большие радиальные зазоры между цилиндрами служат для протока воздуха. Их площадь выбирается такой, чтобы скорость во всех больших зазорах имела близкие значения. Полости с малым радиальным зазором служат для глушения акустического шума. Вследствие значимой разницы гидравлического сопротивления больших и малых радиальных зазоров, считается, что проток через полости с малыми радиальными зазорами не значителен. Соответственно, нет необходимости в торцевых заглушках на малых радиальных зазорах, что позволяет снизить гидравлическое сопротивление устройства за счет минимизации отрыва течения на входах больших радиальных зазоров.

Результаты испытаний, проведенные с полыми цилиндрами, показали, что предложенная конструкция хорошо нивелирует искажения профилей скорости в стационарных и нестационарных потоках, а также успешно снижает акустический шум в широком диапазоне частот. Средняя акустическая эффективность в диапазоне частот от 1 до 100 кГц составляет 14 Дб (5 раз). Это значение хорошо коррелирует с типичными величинами для абсорбционных акустических глушителей. Однако, эффективность глушения шума в предложенном устройстве может быть повышена путем увеличения площади поверхности, от которой отражаются акустические волны. При этом необходимо учесть предъявляемые к кондиционеру потока технологические требования. Наиболее важными из них в рассматриваемом контексте являются: устойчивая и

долговременная работа в грязном и влажном газе, низкое гидравлическое сопротивление, повторяемость характеристик, устойчивость к выдуванию материалов.

В работе рассмотрены варианты заполнения полостей с малыми радиальными зазорами: нержавеющей стружкой, получаемой в результате сверления деталей на станке с ЧПУ; дискретными спиральными элементами, получаемыми навивкой на стержень и разрезанием нержавеющей полосы толщиной 0,15 мм; резиновыми кольцами, получаемыми нарезкой каучуковой трубки. Достаточно крупный размер наполнителей не требует установки торцевых заглушек, что соответствует изначальной идее. Сохранить наполнитель внутри полостей можно обмоткой входа и выхода тонкой проволокой.

В экспериментах были измерены профили скорости в трубе за кондиционером потока, ко входу которого подключался трубопровод с двумя изгибами, потери давления на кондиционере потока и коэффициент глушения шума в диапазоне частот от 6 Гц до 140 кГц. Опыты проведены с использованием оптических методов измерений, поверенных датчиков перепада давления и микрофона ММ-310 Microtech Gefell. Широкополосный шум создавался прокачкой сжатого воздуха через критическое сопло.

Полученные результаты показывают, что наибольшую акустическую эффективность имеют устройства с наполнением резиновыми кольцами и спиральными элементами (средний коэффициент снижения шума в диапазоне частот от 40 до 100 кГц до 20 раз. При частотах ниже 40 кГц средний коэффициент снижения шума 12,7 раз), при этом гидравлическое сопротивление устройств увеличивается до 1,55 раз по сравнению с пустым кондиционером потока. Однако, даже при этом, полученная величина гидравлического сопротивления в 1,7 – 2,7 раз меньше значений для используемых на практике кондиционеров потока. Коэффициенты приведенной эффективности (отношение коэффициента глушения шума к коэффициенту гидравлического сопротивления) для пустого устройства, наполнения из резиновых колец, стружки от сверла и дискретными спиралями соответственно равны: 11,7; 27,4; 19,7 и 27,9. Для сравнения, коэффициент приведенной эффективности стандартного кондиционера потока имеет порядок 1.

Лучшие результаты по выравниванию профилей скорости в диапазоне Re от 2300 до 18700, дали пустое устройство и кондиционер потока с резиновыми кольцами. Эти конфигурации устройства отличаются хорошей повторяемостью профилей и равномерностью скорости по всему сечению трубопровода.

Исследование выполнено за счет гранта РФФ №22-29-01392, <https://rscf.ru/project/22-29-01392/>

УДК 532.546

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Вершинина Ю.В., Дедов А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, Красноказарменная улица, дом 14

Для экспериментального исследования теплообмена и гидродинамики в шаровых засыпках с внутренним тепловыделением, моделирующих микротвэлы ядерного реактора, создан экспериментальный стенд, который включает в себя гидравлический контур, систему измерения, сбора и обработки информации, рабочий участок с шаровой засыпкой, систему высокочастотного индукционного нагрева для обеспечения внутреннего тепловыделения в шаровой засыпке. Стенд рассчитан на следующие режимные параметры: температура теплоносителя до 100°C, давление теплоносителя до 2 МПа, расход теплоносителя (0,01–0,50) кг/с, мощность индукционного нагрева до 20 кВт.

В настоящей работе проведено исследование распределения температуры теплоносителя в рабочем участке с целью получения зависимости объемной плотности тепловыделения по осевой и радиальной координатам. Эксперименты проводились без протока теплоносителя при мощностях индукционного нагрева 2 и 5 кВт. Схема расположения термомпар в рабочем участке приведена на рис. 1.

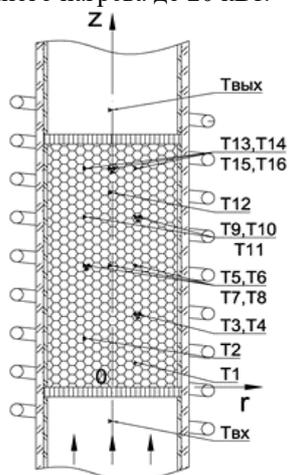


Рис. 1. Расположение термомпар в рабочем участке.

В течение времени работы установки индукционного нагрева показания всех термомпар в РУ растут линейно с разными угловыми коэффициентами. Зная угловой коэффициент для каждой термомпары, можно определить объемную плотность тепловыделения по формуле:

$$q_v = \left[\varepsilon \rho_{ж} c_{р,ж} + (1 - \varepsilon) \rho_{ш} c_{р,ш} \right] \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

где q_v – объемная плотность тепловыделения, Вт/м³, $c_{р,ж}$, $c_{р,ш}$ – удельные теплоемкости жидкости и шариков при постоянном давлении, ε – пористость шаровой засыпки, в экспериментах $\varepsilon = 0,385$.

На рис. 2, 3 представлены распределения температур по осевой и радиальным координатам в разные моменты времени, можно видеть, что по осевой координате профиль температуры существенно неоднородный, температура максимальна в центральной части и снижается к торцам засыпки. Такое распределение температуры связано, по всей видимости, с неоднородностью магнитного поля индукционной катушки. По радиальной координате можно видеть равномерный прогрев шаровой засыпки.

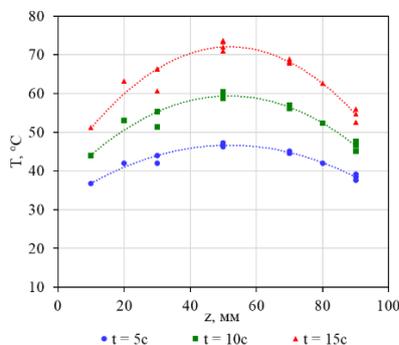


Рис. 2. Распределение температуры по осевой координате при мощности индукционного нагрева 2 кВт.

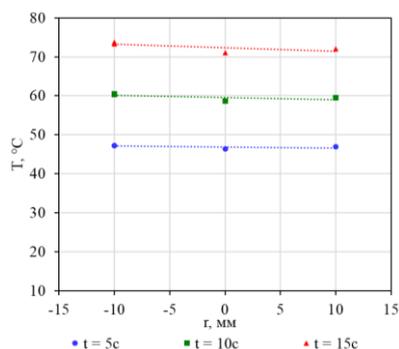


Рис. 3. Распределение температуры по радиальной координате при z = 50 мм и мощности индукционного нагрева 2 кВт.

В результате обработки всего массива экспериментальных данных получена зависимость объемной плотности тепловыделения по высоте засыпки (рис. 4). Данные хорошо аппроксимируются функцией косинуса, записанной относительно центра засыпки:

$$q_v = q_{vmax} \cos\left(2,3 \frac{z - z_c}{H}\right), \quad (2)$$

где q_{vmax} – максимальной значение объемная плотность тепловыделения, z – осевая координата, z_c – координата центра засыпки, H – высота засыпки. Разброс экспериментальных точек относительно зависимости (2) не превышает 10%.

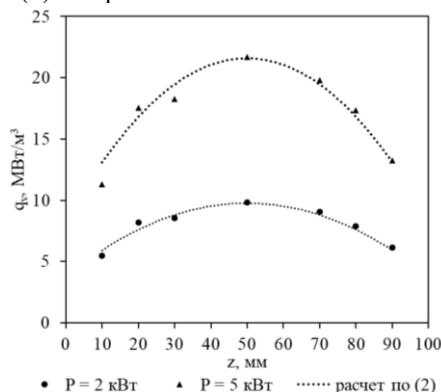


Рис. 4. Распределение объемной плотности тепловыделения по высоте засыпки.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-4552.2022.4

УДК 620.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВОГО ВИХРЯ С ПОМОЩЬЮ PIV МЕТОДА И АКУСТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**Гореликов Е.Ю.^{1,2}, Литвинов И.В.^{1,2}, Окулов В.Л.**¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Развитие роторной аэродинамики сегодня направлено на исследование динамики вихревых роторных следов и построение новых аэродинамических моделей взаимодействия с ними для поиска оптимальных компоновок каскадов ветроэлектростанций. Вихревая теория винта до сих пор остаётся одной из самых сложных и важных разделов аэродинамики. Развитие современной вычислительной техники и методик позволяет производить более точное моделирование винтовых вихревых структур с гауссовым распределением завихренности в ядре [1], что представляет собой новый результат, требующий верификации с экспериментальными данными. В этой связи, в данной работе исследуется реальное распределение осевой компоненты завихренности для течения с формированием прецессирующего вихря.

Экспериментальная установка представляет собой радиальный завихритель с контролируемым углом установки лопаток, что позволяет получать в эксперименте течение с интегральным параметром закрутки $S=0-1,3$ [2]. Угол лопаток устанавливается с точностью 1° . Воздух подается воздуходувкой, при этом расход измеряется ультразвуковым расходомером с погрешностью 1,5%. С помощью разработанного программного обеспечения реализуется точное управление режимом закрученного течения и, собственно, параметров вихревой винтовой структуры. Для регистрации полей скорости используется система PIV «ПОЛИС». На рисунке 1 показана схема измерения, расположение камеры и лазера относительно закрученного потока. Лазерный луч был преобразован в лазерный нож толщиной менее 1 мм с помощью системы цилиндрических и сферических линз. В качестве трассеров потока использовались частицы вазелинового масла с размеров 1-3 мкм. Для измерения азимутального положения прецессирующего вихря использовались четыре акустических датчика пульсаций давления, которые представляли собой отборники давления, надвинутые на измерительные микрофоны Behringer ECM8000 и соединенные гибкой медной трубкой с плоскостью выходного сопла вихревой камеры.

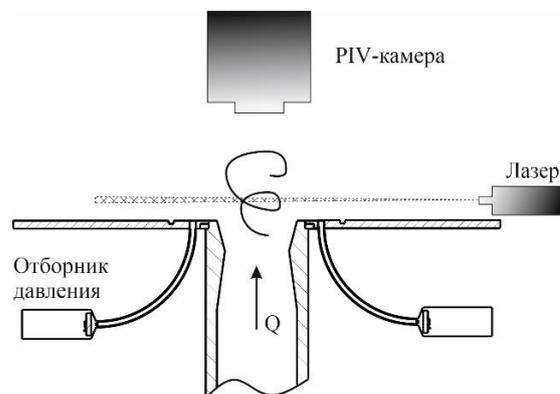


Рис. 1. Схема измерения.

В работе проводились измерения фазово-осредненного распределения скорости в горизонтальном сечении для параметра закрутки потока от $S=0,6 - 1,0$, соответствующих режимам с формированием прецессирующего вихревого ядра [2, 3]. Полученные экспериментальные данные необходимы для дальнейшей аппроксимации и учёта в модели винтового вихря.

Список литературы:

1. Okulov V. L., Fukumoto Y. Review of Analytical Approaches for Simulating Motions of Helical Vortex. *Front //Energy Res.* 2022. Т. 10. С. 817941.
2. Litvinov I. V. et al. Analysis of the swirl number in a radial swirler // *AIP Conference Proceedings.* AIP Publishing LLC. 2020. Т. 2211. № 1. С. 040005.
3. Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N. Swirl flows // *Tunbridge Wells.* 1984.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РЦНИ в рамках проекта № 21-58-50003 (в части измерения распределений скорости), а также в рамках государственного задания ИТ СО РАН (в части использования инфраструктуры и оборудования)

УДК 662.75

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПЫЛЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Горшков А.С., Гвоздяков Д.В., Зенков А.В.

НИ ТПУ,

634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

В настоящее время существует запрос на обоснование применения альтернативных видов энергоносителей. В качестве перспективного варианта рассматриваются в том числе и многокомпонентные топлива. К ним относятся и водоугольные суспензии (ВУС) [1]. Использование в качестве компонент ВУС отходов угольнообогатительных фабрик, отработанных нефтепродуктов, сточных вод, жидких отходов химических производств значительно уменьшает их стоимость. Несмотря на то, что теплотворная способность ВУС в среднем в два раза ниже, чем у угля [2], добавка в состав суспензии отработанных нефтепродуктов или отходов химических производств позволяет увеличить калорийность ВУС. Одним из показателей перспективности применения ВУС определенного состава являются характеристики распыления: скорости (W), размера частиц (δ), угла раскрытия струи (θ) и др.

В настоящей работе представлены результаты визуализации струи после распыления многокомпонентных ВУС и количественная оценка основных ее параметров (средних значений - W , δ , θ). Распыление производилось в специализированной камере (в основе которой цилиндрическая конструкция диаметром 2 м и длиной 6 м), предназначенной для исследований характеристик распыления жидких топлив и форсунок, в условиях, близким к реальным (по условиям расходов, давлений и температур).

Была использована форсунка со внутренним смешением, с выходным диаметром 5 мм.

Регистрация структуры установившегося потока распыляемого ВУС, скорости капель и угла раскрытия струи осуществлялась методом PIV (Particle Image Velocimetry, метод цифровой трассерной визуализации). Для определения размеров идентифицированных капель распыленного ВУС использовался метод IPI (Interferometric Particle Imaging).

Исследования выполнены для нескольких составов ВУС, а именно для двухкомпонентного водоугольного топлива, водоугольной суспензии с добавками пирогенетической жидкости при температуре распыляющего агента от 373 К до 393 К и давлениях от 0,3-0,5 МПа.

Для подготовки составов водоугольных суспензий использовались: измельченный до фракции размером менее 200 мкм длиннопламенный уголь; техническая вода; пирогенетическая вода.

Были использовано три различных типа ВУС, неизменно содержащих 50 мас.% угля. Составы обозначены следующим образом: 50/0, 40/10 и 30/20 (массовая доля технической воды и пирогенетической воды соответственно).

На рисунке 1 представлены величины плотности и динамической вязкости исследуемых образцов. Незначительное увеличение плотности ВУС при замещении пирогенетической водой не оказывает влияние на процесс каплеобразования в процессе распыления.

Увеличение вязкости при введении в ВУС пирогенетической воды негативно сказывается на реологических свойствах такой смеси.

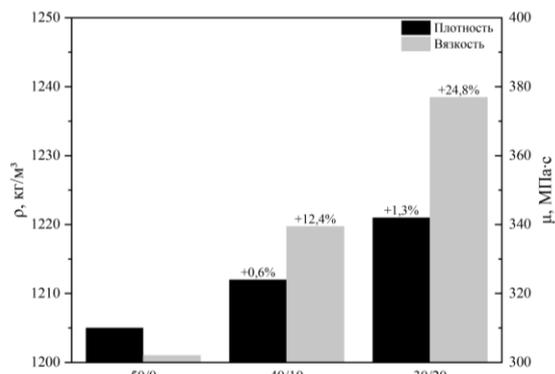


Рис. 1. Истинная плотность и динамическая вязкость исследуемых ВУС.

Ниже приведены типичные фотографии струи при распыле разных составов предварительно нагретым воздухом.

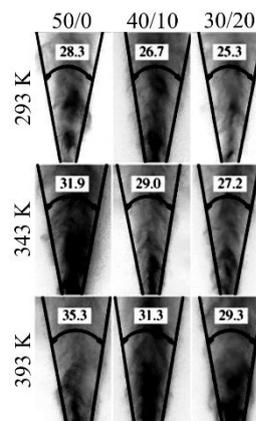


Рис. 2. Углы раскрытия струи ВУС после распыления.

При замещении пирогенетической водой наблюдается уменьшение зоны воспламенения и соответственное ухудшение эффективности процесса горения. Это связано с ухудшенным диспергированием ВУС при распыле. При использовании предварительно нагретого до температуры 393 К распыляющего агента (воздуха) Наблюдается относительное увеличение угла θ на 20%, 15% и 14% для образцов 50/0, 40/10 и 30/20 соответственно.

Список литературы:

1. Z. Wang, M.L. Wyszynski, H. Xu. Fuel injection and combustion study by the combination of mass flow rate and heat release rate with single and multiple injection strategies // Fuel Processing Technology. 2015. V. 132. P. 118-132.
2. A. A. Siyal, A. Low, R. Shamsuddin. Fatty acid distillate as an alternative boiler fuel // Energy Reports. 2021. V. 7. P. 8688-8698.

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СУТОЧНОМ ЦИКЛЕ АДСОРБЦИОННОГО ЗАПАСАНИЯ ТЕПЛА: СТАДИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА

Грекова А.Д., Стрелова С.В., Соловьева М.В., Токарев М.М.

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 5

Адсорбционное преобразование тепла – перспективная ресурсосберегающая технология, позволяющая рационально использовать альтернативные источники тепла. Одной из важнейших частей адсорбционного аккумулятора тепла является адсорбер-теплообменник (АТО). Параметры теплопередачи в этом блоке определяют, насколько быстро будет выделяться тепло, запасенное от альтернативного источника энергии, такого как, например, Солнце. Для проектирования адсорбционных аккумуляторов тепла в основном применяют пластинчато-ребристые теплообменники. В данной работе рассмотрена методика определения перспективности теплообменника в зависимости от его геометрии. Для адсорбционного цикла суточного аккумулирования тепла теоретически оценены глобальные коэффициенты теплопередачи на стадии выделения тепла для ряда промышленных пластинчато-ребристых теплообменников.

Глобальный коэффициент теплопередачи в случае геометрии такого типа определяется формулой (выражение 1):

$$UA = A \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2(1+E(k-1))} \right]^{-1} \quad (1)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи «среда1-металл» и «металл-среда2» соответственно (причем $\alpha_1 > \alpha_2$, Вт/(м²К)), $\lambda_{ст}$ – теплопроводность стенки (Вт/(мК)) АТО, $\delta_{ст}$ – толщина стенки канала (м), E – коэффициент эффективности ребра, K – коэффициент оребрения, A – площадь первичной поверхности ТО, UA – коэффициент теплопередачи ТО (Вт/К) [1,2].

Впервые предложена оригинальная методика измерения параметра α_2 в условиях инициации сорбции скачком давления – именно в таком режиме работает адсорбционный теплотрансформатор на стадии выделения тепла. В качестве рабочей пары рассмотрена перспективная система композитный сорбент LiCl/SiO₂-метанол. Значение коэффициента теплопередачи в условиях стадии выделения тепла составило 260 ± 10 Вт/(м²К). Это значение и было использовано для расчета теоретического значения глобального коэффициента теплопередачи исследованных АТО на стадии выделения тепла по формуле (1) для ряда пластинчато-ребристых теплообменников. Для трех промышленно производимых теплообменников значения UA определены экспериментально (рис.1) как угол наклона зависимости максимальной мощности, реализуемой на стадии высвобождения тепла в зависимости от температуры сорбции. Экспериментально измеренные и теоретически рассчитанные значения UA находятся в хорошем соответствии друг с другом. Таким образом, в режиме, обеспечивающем максимальную мощность на стадии выделения необходимо принимать в расчет геометрию АТО, так как значение мак-

симальной мощности пропорционально коэффициенту UA , являющемся функцией геометрических параметров ТО.

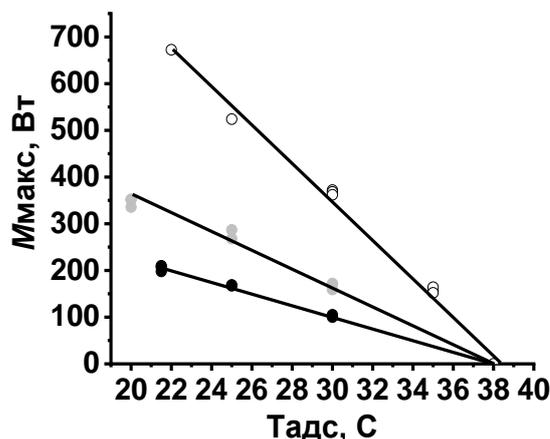


Рис. 1. Зависимость максимальной мощности от температуры адсорбции для АТО с различной геометрией.

Символы – экспериментальные точки:
(●) – ТО №1, (●) – ТО №2, (○) – ТО №3.

В сорбционных экспериментах варьировали как скорость движения теплоносителя, так и скорость подачи паров метанола в реакционную камеру. Суммируя данные адсорбционных экспериментов для цикла суточного запасаения тепла, можно сформулировать следующие рекомендации для проектирования АТО адсорбционных тепловых аккумуляторов:

- 1) Для реализации как можно более высокого показателя максимальной мощности и наиболее быстрой регенерации сорбента необходимо выбирать АТО с наибольшим коэффициентом глобального теплопереноса UA ;
- 2) При необходимости получить максимальный разогрев теплоносителя необходимо уменьшать скорость потока теплоносителя;
- 3) Для контроля продолжительности стадии выделения необходимо регулировать скорость подачи паров из испарителя в реактор.

Список литературы:

1. Основы теории теплообмена / Кутателадзе С.С. ; М: Атомиздат, 1979. 416 с.
2. Handbook of heat transfer / editors, W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, Y.I. Cho. m 3rd ed., McGraw-Hill, 1998.

Работа выполнена при поддержке РФФ
грант № 21-79-10183

УДК 621.438

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ДЛЯ РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТУПЕНИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Грибин В.Г., Андрианов Д.М., Макаров А.Ю., Попов В.В., Тищенко В.А., Тищенко А.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, Красноказарменная, 14

Использование газотурбинных установок (ГТУ) и комбинированных циклов (ПГУ) для выработки электроэнергии в настоящее время является основным вектором развития энергетики.

Одним из перспективных направлений совершенствования ГТУ и ПГУ является уменьшение аэродинамических потерь в проточных частях газовых турбин. Для этого, необходимы новые технические решения, создание методик расчетов и инструментов, которые повысят качество проектирования, ускорят процессы поиска и разработки оптимальных конструкций.

В данной работе представлены элементы дизайн системы, которая разрабатывается на кафедре паровых и газовых турбин имени А.В. Щегляева НИУ «МЭИ» для проектирования проточных частей турбомашин. Рассмотрены различные методики определения потерь энергии в ступени газовой турбины [1]. Выбор методики расчета потерь необходим для наиболее точного определения газодинамических и геометрических параметров с целью оптимизации конструкций проточных частей газовых турбин [2].

В работе проведено сравнение результатов, полученных по различным расчетным моделям и эмпирическим соотношениям для определения потерь энергии в ступенях осевых турбин. Рассмотренные модели также позволяют определить степень влияния геометрических и режимных параметров на составляющие потерь. В работе исследовались методики: Эйнли и Мэтисона (ANM), Дентона (DN), Крейга и Кокса (CAC), Содерберга (SB) и Центрального института авиационного моторостроения (ЦИАМ) [3]. Показано, что на точность расчетов потерь, полученных по различным моделям, в значительной степени влияет скорость потока.

Для определения возможных погрешностей проводилось сравнение результатов расчетов и экспериментов в широком диапазоне режимных параметров. Для исходных профилей сопловой и рабочей решетки (см. рис. 1) [4] получены значения профильных, концевых потерь, а также КПД ступени. Рассмотренные расчетные модели при дозвуковых скоростях потока, как правило, завышают значения профильных потерь.

Выбор модели определения потерь почти не влияет на точность расчета кинематических параметров ступени, но при этом, их выбор является важным фактором для оценки КПД ступени (см. рис. 2), которая также зависит от коэффициента $u/cф$ (отношение окружной - u к фиктивной скорости - $cф$) [1].

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1) рассмотренные методики дают хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных в дозвуковом диапазоне скоростей;

2) значения суммарных потерь для сопловой решетки лежат в диапазоне 4,2% - 5%, для рабочей - 4,5% - 7,2%;

3) расчетные значения потерь, полученные по моделям Крейга и Кокса (CAC), Дентона (DN), ЦИАМа, наиболее близки к экспериментальным данным.

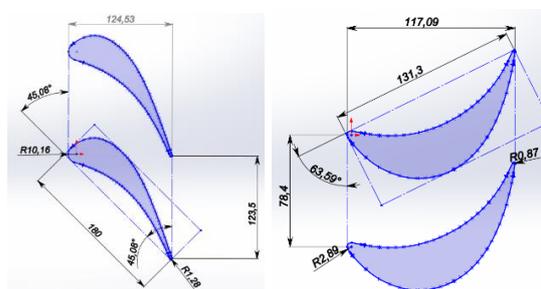


Рис.1. Геометрия исследуемых профилей сопловой и рабочей решеток.

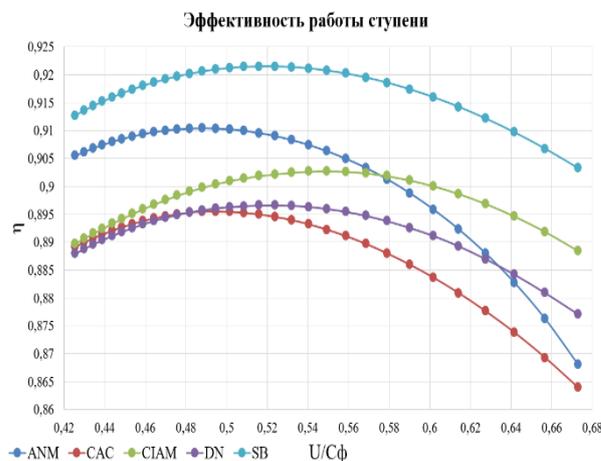


Рис.2. Расчетные значения относительного лопаточного КПД ступени.

Список литературы:

1. Дейч М.Е. Газодинамика решеток турбомашин / М.Е. Дейч; под ред. чл.-корр. РАН Г.А. Филиппова. М.: Энергоатомиздат. 1996. 528 с.
2. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / Белоусов А. Н., Мусаткин Н. Ф., Радько В. М. Учебник для вузов. 2-е изд., испр., доп. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2003. — 344с.
3. Zhengping Zou. Axial Turbine Aerodynamics for Aero-engines Flow Analysis and Aerodynamics Design. Songtao Wang Huoxing Liu, Weihao Zhang. // Shanghai, China. 2018. P.563.
4. Атлас экспериментальных характеристик плоских решеток охлаждаемых газовых турбин / Венедиктов В. Д., Грановский А. В., Карелин А. М., Колесов А. Н., Мухтаров М. Х. Типография ЦИАМ. 1990. 393 с.

УДК 62-9

АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТЕНА НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ**Дектерев Д.А.^{1,2}, Дектерев А.А.^{1,2}, Дектерев Ар.А.^{1,2}, Вавилов Д.В.²**¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

Эксперимент в аэродинамических трубах является важной составляющей в исследованиях аэродинамики всевозможных объектов: от моделей зданий, отдельных элементов транспортных средств или спортивных снарядов до полномасштабных автомобилей и летательных аппаратов. Обычно аэродинамические трубы являются основательными сооружениями, требующими больших площадей для размещения и значительных мощностей. Эксперименты в таких трубах являются сложными и затратными мероприятиями.

Как альтернативный вариант для ряда задач, не требующих низкотурбулентных потоков, предлагается использование аэродинамической стены на основе промышленных осевых вентиляторов. К преимуществам стены можно отнести возможность создания большой выходной площади, мобильность и невысокие требуемые мощности. Кроме того, за счет индивидуального управления скоростью вращения вентиляторов есть возможность создания сложных выходных профилей потока – это важно, например, для создания логарифмического околосреднего профиля ветра при моделировании задач обтекания зданий и застройки.

В данной работе приводятся результаты предварительного численного моделирования аэродинамических стен, состоящих из различных по количеству массивов вентиляторов. На основании расчетов подтверждается возможность создания прямооточного потока с равномерным профилем и скоростью до 10 м/с при создании массива 4x4 вентилятора ВО-6-300 №4 0,75 кВт/3000 об/мин. Данные вентиляторы были выбраны из-за оптимальных характеристик: габариты, скорость выходного потока более 10 м/с, потребляемая мощность.

Также приведены результаты лабораторного исследования модельного массива 4x4 вентилятора, созданного из серверных вентиляторов DELTA PFC1212DE. Исследования показали, что равномерный поток формируется на удалении не менее 8H (где H – характерная высота вентилятора) от сборки, на меньших расстояниях скорость потока неравномерна за счет наличия больших пассивных зон между вентиляторами и сложным выходным закрученным потоком на выходе за каждым элементом сборки. Также проведено исследование влияния конфузоров на характеристики потока, показано, что при использовании осевых вентиляторов, создающих малое избыточное давление, оптимальным уменьшением выходного сечения является $F1/F2 = 1,5$, при этом и скорость потока увеличивается практически в полтора раза. При дальнейшем сужении выходного сечения, скорость увеличивается в меньшей степени. Результаты модельного эксперимента подтвердили расчетные данные и дали основание для создания натурной аэродинамической стены из промышленных вентиляторов.

На рис. 1 представлена аэродинамическая стена в сборе. Каждый горизонтальный ряд (4 вентилятора) управляется частотным преобразователем, что позволяет управлять выходным профилем потока. При общей площади стены 4м², активная площадь – 2м².

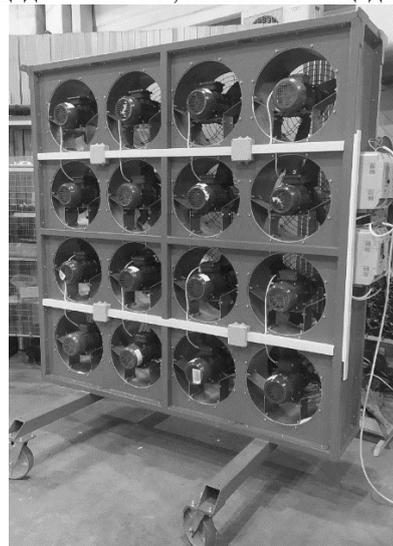


Рис.1 Аэродинамическая стена.

На рис. 2 приведены профили скорости в горизонтальном сечении на удалении 3 метров (7,5 H) от аэродинамической стены. Приведено сопоставление профилей для стены без конфузора (2x2 м) и с конфузром сечением 1,5x1,5 м.



Рис.2 Профили скорости потока.

Из графиков видно, что при применении конфузора, сужающего поток в 1,7 раз, скорость потока увеличивается в 1,4 раза, при этом скорость в ядре потока становится более равномерной.

Таким образом, показана возможность создания аэродинамической стены на основе промышленных вентиляторов, позволяющей создавать поток со скоростью до 10 - 15 м/с. Подобные устройства могут использоваться для качественного изучения аэродинамики во многих областях науки и техники.

УДК 621.565.82

ПРОИЗВОДСТВО ЖИДКОГО ЛЬДА В ГЕНЕРАТОРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Егорова А.И., Рябкин С.С., Кротов А.С., Жердев А.А.

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана,
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская, 5 к.1

Двухфазные хладоносители являются альтернативой однофазным хладоносителям за счет использования скрытой теплоты фазового перехода. В условиях ужесточений требований по углеродному следу, возрос интерес к эффективным вторичным хладоносителям и системам с малой заправкой хладагента. Двухфазный хладоноситель, например, жидкий лед, за счет своих теплофизических свойств, потенциально позволяет снизить разницу в энергопотреблении систем непосредственного охлаждения и систем с вторичным хладоносителем, которая может достигать 20%, а также капитальные затраты на оборудование. Раствор с концентрацией кристаллов льда до 30% по массе может быть перекачан по трубам насосами как обычная жидкость [1].

Тем не менее, технологические решения систем холодоснабжения на двухфазных хладоносителях не распространены широко и специфичны чаще всего для рыбопромысловой промышленности. Актуальные методы производства жидкого льда имеют недостатки, влияющие на выбор технологии. Оборудование ненадежно и дорого в обслуживании, требует большой разности температур между кипящим хладагентом и раствором для производства льда, что сказывается на конечном энергопотреблении установки.

Повысить привлекательность метода можно за счет отказа от движущихся частей и многочисленных приводов, удешевления оборудования, а также за счет снижения разности температур кипения и кристаллизации раствора.

Перспективными в сфере генерации жидкого льда считаются способы, в которых отделение намерзающего слоя осуществляется за счет периодического нагрева теплообменной поверхности, на которой происходит кристаллизация льда. Например, импульсное электрическое или электромагнитное воздействие. Однако подобные разработки были основаны на разности плотностей льда и жидкости: генерация льда в неподвижной жидкости до заданной концентрации в общем объеме [2]. Такое решение применимо для аккумуляции энергии, но не для постоянной эксплуатации системы, когда жидкий лед подается непосредственно потребителю.

Было предложено решение использовать периодический нагрев поверхности кристаллизации в потоке жидкости. Для этого авторами работы предложен новый тип кристаллизатора, который основан на теплообменном аппарате типа «труба в трубе». Таким образом, в перспективе можно получать двухфазный хладоноситель с заданным составом по кристаллизованной фазе. Неизвестны данные о таких типах кристаллизаторов, режимах их работы, энергопотреблении, производительности.

В данной работе поверхность теплообмена кристаллизатора подвергается воздействию переменного магнитного поля, индуцирующего в металлической поверхности вихревые токи. При высокой частоте переменного магнитного поля токи вытесняются к поверхности металла, и нагреву подвергается только тонкая прослойка на его оболочке. Данное явление позволяет вносить в систему незначительный теплоприток порядка 1-2%, что положительно сказывается на энергопотреблении установки [3].

Разработана предварительная математическая модель, согласно которой кристаллизуется до 10% в рабочем объеме кристаллизатора, что было принято, как удовлетворительное значение для проведения эксперимента.

Создан стенд, получены данные по режимам работы кристаллизатора для получения максимальной производительности, скорость захлаживания системы и выхода на режим, распределение температур по рабочей поверхности, производительность кристаллизатора с применением индукционного нагрева теплообменной поверхности.

По итогам работы сделаны выводы об актуальности генераторов жидкого льда с применением индукционного нагрева теплообменной поверхности. Оценены производительность и энергопотребление по сравнению со скребковыми генераторами жидкого льда. Различие возможных габаритных исполнений подобного типа кристаллизаторов позволяет заявить о широком диапазоне производительностей по жидкому льду. Таким образом, генератор жидкого льда с применением индукционного нагрева станет определенной промежуточной нишей между скребковыми генераторами малой и средней производительностей и генераторами вакуумного типа, для которых характерна большая производительность.

Дальнейшая работа по верификации математической модели с экспериментальными данными даёт задел на практическое применение модели с целью проектирования генераторов жидкого льда с применением индукционного нагрева различных производительностей и размеров.

Список литературы:

1. Kauffeld M., Kawaji M., Egolp P.W. Handbook on Ice slurries // International Institute of Refrigeration, 2005.
2. Schaaf J., Kauffeld M. Ice aluminium debonding with induction heating // Journal of Adhesion Science and Technology, 2018.
3. Kolesnikov, A., Krotov, A., Pronin, D., Egorova, A., Samokhvalov, Y., & Zherdev, A. A study of ice slurry production process based on electric heating of heat transfer surface // Refrigeration Science and Technology. 2019. V. 2019 August. pp. 2312–2317.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект № 22-19-00018)*

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АММИАКА В ТЕПЛОВЫХ НАСОСАХ**Елистратов С.Л., Сеськин И.Н.**Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

В докладе конференции рассматриваются возможности для повышения эффективности рабочих циклов парокомпрессионных тепловых насосов (ПКТН) при использовании аммиака (R717) в качестве рабочего тела.

Решения проблем экономии, экологии и энергоэффективности приводят нас к поиску более эффективных и экологически безопасных вариантов генерации энергии. В частности, и тепловой. Тепловые насосы (ТН) позволяют существенно снизить углеродную нагрузку традиционной генерации и одновременно с этим повысить энергоэффективность.

Переход к использованию в ТН рабочих тел природного происхождения сейчас является общемировой тенденцией и отвечает международным требованиям энергетической, экологической и экономической эффективности. С недавних пор изменились условия международного сотрудничества, и крупные мировые производители хладагентов перестали осуществлять поставки в Россию. Возник некоторый дефицит и соответственно значительно выросла цена фреонов. Готовящийся в Евросоюзе проект ограниченный в отношении пер- и полифторалкильных соединений (ПФАС) предполагает запрет значительного числа ГФУ-хладагентов. Локализация производства Гидрофторолефинов (ГФО) в России не предвидится.

В ближайшее время будут доминировать природные рабочие вещества (хладагенты): аммиак, углеводороды, диоксид углерода, вода, воздух. Потребуется более здравый подход к требованиям безопасности их применения с учетом новых технических достижений. Повысится интерес к новым экологически безопасным и энергетически эффективным принципам получения тепла и холода.

Аммиак (NH₃, R717) – как хладагент отличное рабочее вещество, с отличными термодинамическими свойствами благодаря высокой удельной теплоте парообразования.

Аммиак обладает очень высокой удельной энтальпией испарения [кДж/кг] по сравнению с R134a. Это приводит к расходу малой массы, которая снижает необходимые размеры трубопроводов и клапанов. Другим преимуществом, является то, что объемная способность нагрева [кДж/м³] -относительно высокая. При -5°C/50°C температуре испарения/конденсации, необходимый объем компрессора для систем тепловых насосов, работающих на R134a, будет превышать систему, работающую на аммиаке.

Тепловые насосы, работающие на аммиаке, достигают более высокой эффективности использования энергии, чем системы R407C и R134a при тех же рабочих условиях. Для теоретического однофазового цикла теплового насоса, работающего при температуре испарения/конденсации -5°C/50°C, при изотропическом/адиабатическом сжатии и без перегрева или

переохлаждения при всасывании, издержки производства на цикл аммиака составляют на 7% и 11% больше, чем в циклах R134a и R407C. Разница будет больше в реальных системах в результате благоприятных термофизических свойств аммиака. Это включает более высокую температуру кривой насыщения, превосходные свойства теплообмена и высокую эффективность компрессора. При коэффициентах низкого давления аммиачные компрессоры намного лучше ГФУ компрессоров, тогда как относительно идентичные коэффициенты полезного действия компрессоров достигаются при коэффициентах высокого давления.

Температура аммиака при выходе газа намного выше температуры ГФУ. Для обеспечения надежной и энергоэкономичной работы компрессора, интерес представляют различные меры, включая низкотемпературную систему распределения тепла, высоко-температурный источник тепла, больше поверхностей для испарителя и конденсатора, работа затопленного испарителя, короткие и хорошо изолированные приемные линии, крышки цилиндра с водяным охлаждением для поршневых компрессоров, двухступенчатые установки при коэффициенте сжатия выше 5 - 6, и пароохладитель для снятия перегрева и производства горячей воды.

Для определения термодинамических свойств рабочих тел (РТ) используем удобную для практической работы инженерную программу Coolpak [7], содержащую данные о термодинамических и теплофизических свойствах широкого спектра хладагентов искусственного и естественного происхождения.

Список литературы:

1. Бондаренко Д.В., Шевчук И.И. Высокотемпературный тепловой насос для нужд отопления, использующий в качестве источника теплоты воды озера Старая Кубань // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2.
2. Дж. Стин, 1998: МЭА Приложение 22: Заключительный Отчет – Инструкции по проектированию и эксплуатации систем компрессионных тепловых насосов, кондиционирования воздуха и охлаждения, работающих на природных рабочих жидкостях. МЭА ПТН Отчет №. HPP-AN22-4. ISBN 90-73741-31-9.
3. Дзино А.А., Малинина О.С. . ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ. Учебно-метод. пособие. Университет ИТМО. С. Петербург 2016.
4. Н.В. Миронова, С.Л. Елистратов, Ю.В. Овчинников, В.Г. Томилова. Повышение термодинамической эффективности рабочих циклов парокомпрессионных тепловых насосов. ISSN 1814-1196 Научный вестник НГТУ Т.71. №2. 2018, с.143–156.
5. П.А. Трубаев, Б.М. Гришко. ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Белгород 2010.
6. Ян Боне, Тадаси Хамаока, Николай Овсянников, Вадим Дмитриев. Утилизация тепла конденсации холодильной установки с помощью аммиачного теплового насоса. МАЙЕКАWA MFG. CO., LTD. Токио, Япония. Холодильный бизнес №7 июль 2015г.
7. CoolPack, 2000. Програма моделювання для теплових насосів та холодильних установок, розроблена в Технічному Університеті Данії (свободно розповсюджується ПО). <http://www.et.web.mek.dtu.dk/Coolpack/UK/>

УДК 662.75

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ И ИХ ФРАКЦИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ПИРОЛИЗА РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Калтаев А.Ж.¹, Ларионов К.Б.^{1,2,3}, Губин В.Е.^{1,4}

¹ Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30.

² Университет науки и технологий МИСИС,
Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр.

³ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева,
650000, Кемеровская область – Кузбасс, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

⁴ Севастопольский государственный университет,
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.

В 2022 году количество проданных новых автомобилей составило 67.2 миллион, что больше чем в 2021 на 0.5 миллиона [1]. При этом ежегодно в мире формируется около 4 миллиардов отработанных автомобильных шин [2], что является экономической и экологической проблемой. Отработанные шины не поддаются биологическому разложению, поэтому без дальнейшего обращения они могут храниться на свалке годами. Складирование отработанных шин потенциально представляет риск неконтролируемого возгорания. Также на таких свалках в изгибах покрышек может скапливаться дождевая вода, которая со временем будет выщелачивать токсичные соединения (например, тяжелые металлы). Это может привести к загрязнению грунтовых вод и оказать негативное влияние на организмы, обитающие в водной среде. Кроме того, свалки для такого объема резины могут занимать большие площади земли.

Отработанные шины могут быть повторно использованы (методом восстановления протектора шин) или переработаны в резиновую крошку для последующего использования в гражданском строительстве, например покрытия для спортивных площадок или добавки в асфальт, для производства ковров и пр. Однако такие методы могут покрыть лишь малую часть объема отходов резины.

К альтернативному способу переработки относится термический метод – пиролиз или неполное термическое разложение углеводородного сырья в отсутствие кислорода, в результате чего образуется полукокс, неконденсируемый газ и жидкие углеводороды. Полученный полукокс является аналогом технического углерода или может быть использован в качестве твердого топлива. Неконденсируемые газы представлены углеводородами с высокой теплотворной способностью, энергетический потенциал которых можно использовать для компенсации затрат для обеспечения аллотермического процесса пиролиза. В свою очередь жидкие углеводороды могут быть использованы в качестве топлива или сырья для нефтехимической промышленности.

Использование жидких углеводородов в качестве моторного топлива представляет возможность сократить использование природных ресурсов и оказать положительное воздействие на снижение углеродного

следа в целом. Жидкие углеводороды являются сложными органическими соединениями с большим содержанием ароматических групп. Стоит отметить, что теплотворная способность жидких углеводородов варьируется в диапазоне 39–45 МДж/кг [3], что сопоставимо с газообразным видом топлива и бензином [4]. Однако прямое использование жидких углеводородов, полученных в процессе пиролиза отработанных автомобильных шин затруднительно ввиду наличия высокой вязкости и плотности данного продукта. Высокая вязкость топлива может привести к повышенному расходу масла и высокому износу системы топливopодачи. Также неоднородный состав жидких углеводородов приводит к нестабильной работе двигателя и, следовательно, к его износу. Разделение на более однородные по химическому составу и свойствам фракции, позволит использовать жидкие углеводороды более рациональным способом.

В настоящей работе представлено экспериментальное исследование физико-химических характеристик, процессов капельного зажигания и горения широкого спектра фракций жидких углеводородов, полученных в результате пиролиза отработанных шин. Исследование процессов капельного зажигания и горения проводилось на экспериментальной установке условия теплообмена которой приближены к реальному энергетическому оборудованию.

Список литературы:

1. Statista. Number of cars sold worldwide from 2010 to 2022, with a 2023 forecast [Электронный ресурс] // Statista Research Department. 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/200002/international-car-sales-since-1990/> (дата обращения: 20.04.2023).
2. Sathiskumar C., Karthikeyan S. Recycling of waste tires and its energy storage application of by-products –a review // Sustain. Mater. Technol. 2019. Vol. 22. P. e00125.
3. Zhang G., Chen F., Zhang Y., Zhao L., Chen J., Cao L., Gao J., Xu C. Properties and utilization of waste tire pyrolysis oil: A mini review // Fuel Process. Technol. 2021. Vol. 211. P. 106582.
4. Dincer I., Rosen M.A., Khalid F. 3.16 Thermal Energy Production // Comprehensive Energy Systems. 2018. P. 673–706.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации (проекты №075-03-2021-
138/3 (FZES-2021-0008) и №075-00268-20-02
(ID: 0718-2020-0040))*

УДК 621.181:662.921

ЗАМЕЧАНИЯ К ВЫБОРУ КОНЦЕПЦИИ ВИХРЕВОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА ТВЕРДОГО СЫРЬЯ

Костюнин В.В.¹, Потапов В.Н.², Костюнина Т.В.²¹ ООО «Vortex Technology», Екатеринбург² Уральский федеральный университет,
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

При разработке промышленных вихревых газогенераторов [1] получения горючих газов, а, в перспективе, искусственных продуктов – жидких топлив или химического сырья следует, прежде всего, решить две задачи. Первая, - размещение оси вращения рабочего горящего вихря: горизонтальное или вертикальное. Вторая, - количество последовательных рабочих вихревых камер аппарата и стадии процесса, реализованные в них. Опыт ООО «Vortex Technology» продувок холодных моделей на двухфазных потоках, и небольших аппаратов с огневыми процессами, показал - аппараты с вертикальной осью обычно работают на двухфазном вихре неустойчиво. Двухфазный вертикальный вихрь, чувствителен к любым нарушениям планируемой структуры вихря, предложенной расчетом или интуитивно. Это следствие полидисперсности топлива, вводимого в вихрь, и неизбежных колебаний его свойств и расхода, приводящих к деформации вихря в реальных условиях.

Проявляется другой, более сложный и обычно неконтролируемый фактор, - это особенности локализация в объеме вихря плотностей потоков момента количества движения (момента вращения) и количества движения (импульса) идущих, параллельном оси вращения. У этих двух характерных форм представления вихря всегда есть максимумы и относительно незагруженные зоны. В идеальном случае взаимное положение траекторий обоих этих потоков, особенно локализация максимумов и их значения, должны быть стабильными и желательно симметричными относительно оси вихря. Обычно эти условия не выполняются, особенно в улитках, цилиндрических каналах с тангенциальными соплами и некоторых слабо диафрагмированных камерах и в вихревых горелках. По нашему мнению, - это причина возникновения в любых вихрях спиралевидных течений или спиралевидных распределений характеристик потока, особенно двухфазного, что вызывает проблемы для любых технологических аппаратов с вертикальной осью вихря. В пылеуловителях — это неконтролируемый вынос твердой фазы, а в газогенераторах нарушается последовательная цепь реакций, вплоть до разрушения самого горящего вихря. Эти процессы провоцируют неизбежные вертикальные пульсации среды в вихре на тех или иных углах поворота среды вокруг оси, проявляются также и местные изменения крутки, усиливая непостоянство и несимметричность вихря и неравномерность загрузки его твердой фазой. Эти изменения и колебания местной крутки удобно изучать через деформации распределений плотностей потоков момента вращения и импульса [2], в том числе и по радиусам вихря, вызывая как вынос недореагировавшей твердой фазы, так и ее провалы вниз, сквозь все области реактора с отложениями на дне его нижней

камеры. Это дополнительно ослабляет крутку вихря, его деформацию и усиливает опасность разрушения всей технологии.

Поэтому для решения практических задач считаем, что предпочтительны аппараты в 2-4 последовательно включенные вихревые камеры с горизонтальной осью вихря, в которых обычные задачи пиролиза, газогенерации остатка, полноты выгорания горючих в золе и сжигания части полученного газа или мелкой пыли, решаются проще [3]. В этих аппаратах процессы могут иметь более высокую устойчивость и существенно расширить возможности для настройки аппаратов и регулирования всего технологического процесса. На этой базе нами разработаны оригинальные вихревые аппараты газогенерации твердых топлив и биомассы. мощностью 0.5 - 7 МВт по топливу. Мы разработали также и успешно опробовали организацию процесса с возможностью более широкого стадийного или «растянутого» пиролиза и с предельно глубоким выгоранием углерода в золе. Это четырехкамерные реакторы по схеме (см. рис 1).



Рис.1. Схема четырехкамерного реактора.

Испытания такого реактора мощностью около 2,5 МВт по газу обеспечили газификацию отходов переработки сланцев и показали снижение механической неполноты сгорания до 0,03 – 0,04%, а при опытной газификации костной муки без неизбежной подсветки высококалорийным топливом и при устойчивом выходе низкокислородного газа сжигание горючих в золе было снижено в десятки раз, примерно до 0,14-0,3%.

Список литературы:

1. Костюнин В.В., Потапов В.Н. Новая вихревая технология газификации твердого топлива //Сборник докладов VI Всероссийской конференции «Горение твердого топлива» - 2006. Новосибирск: ИТ СО РАН. 2006. Т.2. С. 94-96.
2. Потапов В.Н. Костюнин В.В. Особенности формирования момента вращения в камере аппарата вихревой газогенерации твердого сырья//Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции «Горение твердого топлива» - 2012 - Новосибирск: ИТ СО РАН. 2012. С. 104.
3. Костюнин В.В. Потапов В.Н. Некоторые подходы к стадийному формированию вихря с горением, положенные в основу работоспособного газогенератора разного назначения//Сборник трудов Пятой Международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». 2011. Москва: МЭИ.

УДК 661.961.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ НЕФТЯНОГО КОКСА

Кузнецов А. В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Незаменимые для человечества продукты нефтепереработки могут оказывать пагубное воздействие на окружающую среду, а нефтепромыслы относятся к взрыво- и пожароопасным объектам. Качественный состав отходов определяется производимыми видами товарных нефтепродуктов и используемыми технологиями. Ключевыми отходами отрасли являются нефтяные эмульсии, шламы и осадки очистных сооружений нефтесодержащих сточных вод, нефтешламы от зачистки емкостей и оборудования, а также нефтеемulsionей систем оборотного водоснабжения; загрязненные нефтепродуктами сорбенты; кислые гудроны и другие. Данная работа посвящена исследованию процессов термического разложения и воспламенения твердых отходов нефтепереработки с целью использования их в качестве энергоносителя при экологически чистой утилизации в энергетических котлах.

Сжигание в различных печах является основным методом утилизации данного типа сырья, однако низкое содержание летучих и большое содержание различных примесей делает этот процесс энергозатратным. Использование технологии механоактивационного измельчения позволяет снизить энергозатраты на воспламенение, что делает этот процесс более экономичным и экологически чистым, так как с увеличением реакционной способности топлива снизится необходимость в дополнительных мощностях подвески и розжига [1].

В данной работе проводится термическое разложение твердых отходов нефтяной промышленности. Эксперименты проводились на предварительно высушенном, измельченном и разделенным по фракциям образцам. В качестве испытуемого топлива использовались отходы нефтепереработки – нефтяной кокс, характеристики приведены в таблице.

Массовая доля общей влаги	8,6%
Зольность	0,3%
Доля серы	3,4%
Доля летучих веществ	12%
Содержание углерода	82%

Масса навески образца $9,7 \pm 0,3$ мг. Эксперименты проводили в температурном интервале 50–1000 °С в атмосферах аргона (ОСЧ) и синтетического воздуха (80 % об. Ar, 20 % об. O₂), скорости потоков газов 40 мл/мин аргона, 10 мл/мин кислорода. Использовали открытые тигли из Al₂O₃.

Образец устойчив до температуры порядка 200 °С. В интервале 200–350 °С наблюдается увеличение массы образца, что может быть вызвано хемосорбцией кислорода или окислительным процессом до начала горения образца. Об этом косвенно свидетельствует незначительное уменьшение ионного тока с $m/z=16$ (поскольку термический анализ проводится в

атмосфере синтетического воздуха, сигнал ионного тока молекулярного иона кислорода $m/z=32$ не является информативным вследствие высокой интенсивности, однако поглощение кислорода можно зарегистрировать по изменению сигнала осколочных ионов с $m/z=16$ O⁺ и O₂²⁺), а также увеличение ионных токов ионов с m/z 44 и 18 (CO₂ и H₂O). Дальнейшее разложение протекает в несколько плохо разделенных ступеней. Так в интервале 350–470 °С можно выделить как минимум три ступени, которые проявляются на кривых DTG, DSC и MC-ABГ. Основными газообразными продуктами, выделяющимися в этом диапазоне, являются CO₂ и H₂O (m/z 44 и 18). Кроме этого регистрируется увеличение ионных токов с m/z 15, 16, (CH₄) 30 (NO), 46 (NO₂), 48 и 64 (SO₂) что свидетельствует о выделении и сгорании газообразных углеводородных продуктов содержащих азот и серу. Такой характер разложения, скорее всего, вызван перекрытием процессов выделения летучих продуктов, их воспламенения и сгорания кокса. Выше температуры 470 °С основным протекающим процессом является сгорание кокса, который заканчивается при температуре выше 700 °С. Температура максимальной скорости потери массы в этих условиях составляет 515 °С. При этом ионные токи с m/z 15, 16, (CH₄) 30 (NO), 46 (NO₂), 48 и 64 (SO₂) заметно возрастают. Несгораемый остаток составляет ~1 % от начальной массы образца.

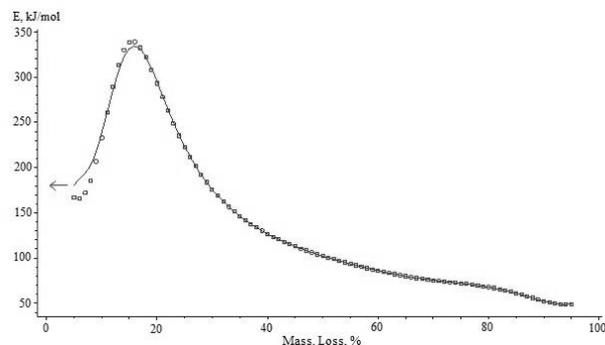


Рис.1 Зависимость энергии активации от степени разложения.

Исследования показали качественное изменение энергии активации от тонкости помола образца и степени разложения (см. рис 1).

Список литературы:

1. G. V. Chernova, A. P. Burdukov, E. B. Butakov // Journal of Physics Conference Series. 2019. V. 1261.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект № 22-29-20280) и Правительства Новосибирской области

УДК 621.9

ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КРУПНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Кузнецов Г.В., Кравченко Е.В.

Томский политехнический университет, Томск, Россия,
634040, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

В последнее десятилетие значительная роль отводится развитию возобновляемых источников энергии. Однако, нестационарность ветровой нагрузки и инсоляции является значительным ограничением для перехода на нетрадиционные возобновляемые источники электроэнергии (НВИЭ) – ветрогенераторы и солнечные батареи. Необходимым фактором энергоперехода при этом является использование систем накопления энергии [1]. Однако, например, передача электрической энергии от типичных электрохимических накопителей к потребителю происходит с рассеиванием части этой энергии в виде тепла. Целесообразна оценка перегрева таких накопителей, которая может привести к существенному снижению ёмкостных и ресурсных характеристик, а в некоторых случаях к возгораниям и взрывам.

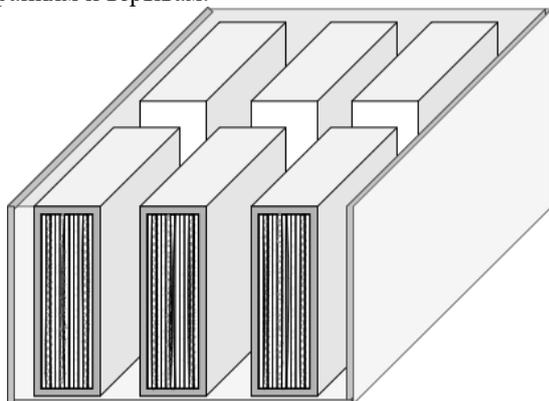


Рис. 1. Моделируемая электрохимическая система хранения электрической энергии

Возгорания АКБ являются следствием роста температуры корпуса батареи выше предельно допустимых значений [2]. В этой связи необходимым становится анализ тепловых режимов отдельных электрохимических накопителей электрической энергии и оценка возможности их использования для создания больших систем таких накопителей, обеспечивающих работу крупных потребителей электроэнергии – промышленных предприятий, транспорта, городских агломераций. Производительность, срок службы и взрывобезопасность электрохимических вторичных батарей существенно зависят от рабочих температур гальванического элемента. Превышение рабочих температур и/или токовых нагрузок увеличивают рассеивание тепла и могут приводить к тепловому разгону. Целью работы является определение теплового режима работы крупной электрохимической системы накопления энергии (СНЭ) (см. рис. 1).

Для решения поставленной задачи использовалась электротепловая модель с сосредоточенными параметрами. Очевидно, что для обеспечения непрерывной работы даже относительно малых по мощности

(единицы мега Ватт) потребителей электрической энергии может понадобиться значительное количество АКБ, поэтому необходимо оценить предельные условия их работы при отводе тепла с внешних поверхностей батарей в режиме естественной конвекции, т.е., без применения специальных устройств охлаждения, для работы которых необходимы затраты электрической энергии.

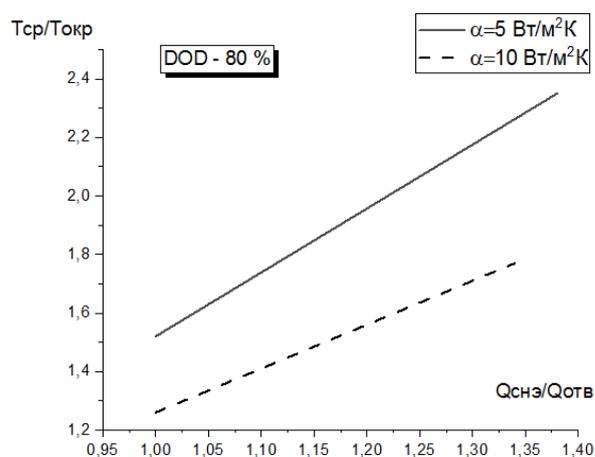


Рис. 2. Безразмерная температура в зависимости от отношения тепловыделения в СНЭ к теплоотводу в условиях естественной конвекции.

Анализ приведенных зависимостей (рис. 2) показывает, что с увеличением значения коэффициента теплообмена уменьшается наклон кривой безразмерной температуры. При этом, отношение средней температуры системы накопителей типа Lead-acid к окружающей составляет 1,77 и 2,35 для $\alpha=10$ и 5 Вт/(м²К).

Рост омических (необратимых) тепловых потерь на 10 % приводит к увеличению средних температур СНЭ в 1,4 и 1,7 раза при $\alpha=10$ и 5 Вт/(м²К). Поэтому, обеспечение теплового режима крупных систем электрохимических накопителей энергии в ряде случаев невозможно без применения специальных систем охлаждения.

Надежное электроснабжение потребителей от НВИЭ и безопасная эксплуатация электрохимической СНЭ зависит от нормального теплового режима аккумуляторной батареи.

Список литературы:

1. Кравченко Е.В. Обзор современных технологий накопления энергии // Компетентность. – 2023. – № 1. – С. 33-38.
2. Kuznetsov G.V., Kravchenko E.V. Evaluation of the limiting conditions for operation of a large electrochemical energy storage system. Journal of Energy Storage. 2023. V. 65. 107384, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107384>.

УДК 51-72

ИНИЦИАЦИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИН В ЗАДАЧАХ ПЕТРОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Лалин В.Н., Черный С.Г.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Петротермальная энергия является одной из наиболее перспективных видов возобновляемых источников энергии [1]. Однако, несмотря на большие запасы тепловой энергии в сухих горных породах, ее возобновляемость и широкое распространение мест, пригодных для использования, развитие петротермальной энергетики ограничивается рядом технических проблем, способы решения которых еще требуют совершенствования. Одной из таких проблем является необходимость создания подземного резервуара с достаточной проницаемостью [1], которая обеспечивала бы низкие потери энергии при фильтрации нагреваемой жидкости от нагнетательной скважины в добычную. Сложность задачи обуславливается необходимостью создания сети трещин на большой (более 3 км) глубине, так как на меньших глубинах использование петротермальной энергии имеет низкий потенциал [2].

Хотя современная горнодобывающая промышленность имеет опыт бурения скважин большой глубины (Кольская сверхглубокая и Z-40 на месторождении Чайво в России, Maersk Oil BD-04A в Катаре и др.), технологию бурения на такие глубины нельзя считать широко распространенной и общедоступной. Еще менее развитой для больших глубин является технология гидроразрыва пласта, который используется для создания трещин. Так, 90% скважин в США для проведения гидроразрыва (наиболее легко получаемая статистика) бурятся на глубинах менее 3.5 км [3].

Ограниченность применения гидроразрыва для пластов глубокого залегания обусловлена не только возрастающей с увеличением глубины стоимостью бурения скважины, но и необходимостью создания высокого давления для инициации и дальнейшего распространения трещины гидроразрыва. Давление p_{init} , требующееся для инициации трещины от перфорированной скважины, может быть сравнительно просто оценено на основе анализа напряженно-деформированного состояния пласта, возможно, с учетом его пористости и пластичности [4] или эффекта размера [5]. Так, в случае упругого материала оно рассчитывается на основе решения задачи Кирша о сжатии плоскости с круговой полостью [6]

$$p_{init} = 3\sigma_h - \sigma_v,$$

где в случае наилучшим образом ориентированной перфорации σ_v и σ_h есть вертикальное и минимальное горизонтальное сжимающие напряжения в пласте [7].

Для определения давления распространения трещины p_{prop} , необходимо решать более сложную задачу распространения с учетом не только параметров пласта, но и свойств используемой жидкости, скорости ее

закачки и т.д. [6]. При этом требования к жидкости при создании давлений инициации и распространения трещины, могут противоречить друг другу. Действительно, давление инициации p_{init} можно достичь путем повышения давления жидкости на поверхности и увеличением гидростатического давления за счет использования более тяжелых жидкостей (например, растворов). В то же время, более тяжелые жидкости обычно имеют большую вязкость и при их использовании для создания трещины гидроразрыва требуется большее давление p_{prop} , поэтому формулировка требований для жидкости, пригодной как для инициации, так и для продолжения распространения трещины гидроразрыва на большой глубине является нетривиальной задачей.

В работе на примере газового месторождения нижний Амин (Оман), залегающего на большой глубине (до 5 км), напряженное состояние которого характеризуется высокими сжимающими напряжениями (120-180 МПа) на основе численного моделирования проведено сравнение давлений инициации и распространения трещины, получающихся при использовании различных жидкостей. Численные результаты для давления распространения получены на основе полной трехмерной модели начального этапа трещины гидроразрыва [6, 8].

Список литературы:

1. Алексеев С.В. Геотермальная энергетика: технологии и перспективы развития // Материалы всероссийской конференции «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа». 29 августа – 3 сентября 2022. С. 9-14.
2. Гнатусь Н.А., Некрасов А.С. Социально-экономическая эффективность использования глубинного тепла Земли в России // Новости теплоснабжения. 2008. №10. С.16-21
3. Jackson, R.B. et al. The depths of hydraulic fracturing and accompanying water use across the United States // Environmental science & technology. 2015. V. 49.15 P. 8969-8976
4. Feng Y., Jones J. F., Gray K.E. A Review on Fracture-Initiation and Propagation Pressures for Lost Circulation and Wellbore Strengthening // SPE Drilling & Completion. 2016. V. 31, N 02, p. 134-144. doi:10.2118/181747-pa
5. Cherny S. et al. Prediction of fracture initiation zones on the surface of three-dimensional structure using the surface curvature, // Engineering Fracture Mechanics. 2017. V. 172. P 196-214.
6. Методы моделирования зарождения и распространения трещин / С.Г. Черный и др. Новосибирск. Из-во СО РАН, 2016. 312 с.
7. Briner A. et al. Impact of Wellbore completion type on fracture initiation pressure in maximum tensile stress criterion model for tight gas field in the sultanate of Oman // International Petroleum Technology Conference. 2015. IPTC-18261-MS.
8. Cherny S.G., Lapin, V.N. 3D model of hydraulic fracture with Herschel-Bulkley compressible fluid pumping // Procedia Structural Integrity. 2016. V.2. P. 2479-2486.

УДК 621.039.58:544.351

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ БОРНОЙ КИСЛОТЫ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВВЭР

Лебезов А.А., Морозов А.В., Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С.

АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», 249033, Россия, Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Активное использование борной кислоты при эксплуатации атомных электрических станций с реакторами типа ВВЭР и PWR обусловлено тем, что входящий в её состав изотоп Бор-10 обладает способностью поглощать нейтроны [1]. Борная кислота устойчива в радиационных полях, не разлагается при высоких температурах, не образует шлама и накипи, в присутствии щелочей является ингибитором коррозии. В связи с этим она применяется в системах борного регулирования, предназначенных для изменения реактивности в течение кампании реактора.

Однако, применение борной кислоты вызывает в теплоносителе первого контура ряд сопутствующих явлений: повышение величины жесткости, изменение рН и возрастание концентрации примесей коррозионного происхождения при всех прочих постоянных условиях [2], поэтому необходима коррекция водного режима путем подщелачивания гидроокисью калия (KOH) (отечественные реакторы) либо гидроокисью лития (LiOH) (на зарубежных реакторах PWR) [3].

Оптимальное ведение водно-химического режима (ВХР) первого контура и функционирование средств его поддержания являются одним из условий минимизации накопления активированных продуктов коррозии, а также радиоактивных отходов и сокращения затрат на их последующую переработку и захоронение.

Так, например, в первом контуре реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 на энергетических уровнях мощности применяется слабощелочной восстановительный аммиачно-калиевый водный режим с борной кислотой. На АЭС с ВВЭР-1200 при работе энергоблока на мощности принят слабощелочной восстановительный координированный водородно-калиевый ВХР с борной кислотой [3].

При авариях, сопровождающихся потерей теплоносителя, растворы борной кислоты используются в пассивных системах безопасности для охлаждения активной зоны реактора. В реакторе ВВЭР-1200 функционирование пассивных систем обеспечивает аварийное охлаждение активной зоны в течение 24 часов за счет подачи в нее раствора НЗВОЗ с концентрацией 16 г/кг из системы гидроемкостей первой и второй ступеней, а также поступления конденсата из парогенераторов, работающих в конденсационном режиме [4].

Необходимость исследования процессов массопереноса высококонцентрированных растворов борной кислоты возникла при обосновании возможности более длительного (до 72 часов) охлаждения активной зоны за счет работы пассивных систем залива при разработке перспективных реакторных установок типа ВВЭР. Фактором, ограничивающим длительность подачи раствора борной кислоты в реактор, является время до достижения ее предельной концентрации в активной зоне. Предел насыщения НЗВОЗ в водном

растворе зависит от температуры. При параметрах, соответствующих аварийному процессу с разрывом главного циркуляционного трубопровода, предельная концентрация борной кислоты в активной зоне составляет ~450 г/кг H₂O [5].

В настоящее время данные о теплофизических свойствах растворов борной кислоты носят весьма общий характер и не охватывают весь диапазон параметров (температура, давление, концентрация кислоты), характерный для аварийной ситуации на АЭС с ВВЭР с учетом влияния особенностей водно-химического режима.

В связи с этим в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» были проведены экспериментальные исследования теплофизических свойств растворов борной кислоты при параметрах характерных для аварийного состояния отечественных реакторов ВВЭР с учетом особенностей водно-химического режима. Впервые были получены опытные данные по плотности и кинематической вязкости высококонцентрированных растворов НЗВОЗ при фиксированной добавке гидроксида калия. Полученные результаты расширяют существующий диапазон известных параметров водных растворов борной кислоты.

Экспериментальные данные по теплофизическим свойствам водных растворов борной кислоты имеют важное прикладное значение для АЭС с реакторными установками ВВЭР нового поколения, оснащенными системами пассивной безопасности. Они могут быть использованы для повышения точности расчетов процессов отвода тепла в реакторной установке ВВЭР как в режиме нормальной эксплуатации, так и в аварийной ситуации.

Список литературы:

1. Баранов В.Ю. Изотопы. Свойства, получение, применение. М.: Физматлит, 2005. 600 с.
2. Забелин А.И. Влияние борной кислоты на величину жесткости теплоносителя кипящего реактора. Димитровград: НИИАР, 1972.
3. Сусякин С.Н., Брыков С.И., Задонский Н.В., Быстрова О.С. Водно-химический режим первого контура для АЭС с ВВЭР-ТОИ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2012. № 32. С. 76-82.
4. Морозов А.В., Калякин Д.С., Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С., Сошкина А.С. Актуальные теплофизические проблемы и пути совершенствования пассивных систем охлаждения активной зоны реактора ВВЭР // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2022. Выпуск 4. С. 119-130.
5. Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С., Морозов А.В. Экспериментальное исследование особенностей растворимости борной кислоты в паре при кипении теплоносителя реактора ВВЭР в случае аварии // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2021. Выпуск 3. С. 167-173.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10649)

УДК 536.42:536.248.2

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ФАЗОИЗМЕНЯЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПРИ НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ

Летушко В.Н., Низовцев М.И., Стерлягов А.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Фазоизменяемые материалы (ФИМ) вследствие высоких значений теплоты фазовых переходов [1] находят широкое применение в разных технических приложениях энергетики [2]. Таким образом закономерности тепловых процессов в ФИМ могут быть использованы при управлении теплообменом в различных энергетических установках. Для моделирования тепловых процессов в ФИМ необходимы расчетные модели, верификация которых требует надежных экспериментальных данных.

Для верификации энтальпийной модели расчета тепловых процессов в ФИМ на специальном стенде были выполнены экспериментальные исследования тепловых параметров при разных положениях ФИМ относительно нагревателя (рис. 1).

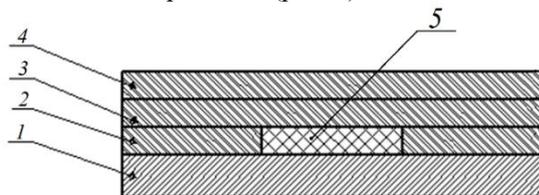


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 – нагреваемая пластина; 2 – слой с ФИМ;
3, 4, – теплоизоляционные слои; 5 – образец ФИМ.

В нижней части исследуемой в экспериментах конструкции находилась равномерно нагреваемая металлическая пластина. Над пластиной располагались несколько слоев из теплоизоляционного материала – минеральной ваты толщиной по 10мм. Один из слоев включал образец фазоизменяемого материала, в качестве которого использовался парафин, теплоизолированный с боковых сторон. Между слоями устанавливались датчики температур и тепловых потоков, которые подключались через АЦП к компьютеру для проведения измерений и сохранения полученных экспериментальных данных. Была проведена серия экспериментов, в которых слой с ФИМ располагался в разных положениях относительно нагреваемой пластины. Эксперименты проводились следующим образом: выполнялся нагрев пластины до определенной температуры, приводящий к фазовому переходу в образце ФИМ, затем нагреватель пластины отключался и происходило ее самопроизвольное охлаждение.

На рис. 2 представлены полученные экспериментальные данные по изменению температуры верхних поверхностей слоев при расположении слоя с ФИМ в положении, приведенном на рис. 1. Полученные данные показывают, что температура верхней поверхности слоя с ФИМ (линия 2) быстро росла, затем происходило замедление темпа роста температуры, что было связано с началом фазового перехода в ФИМ.

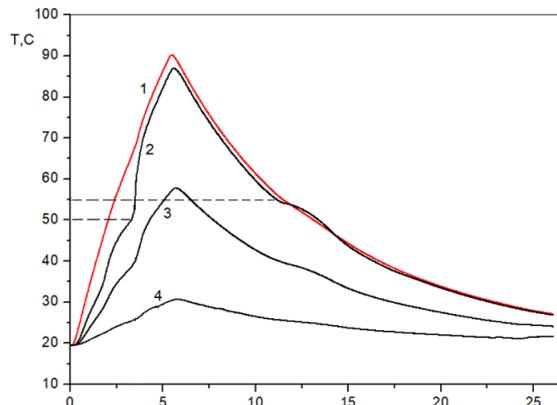


Рис. 2. Изменение температуры верхних поверхностей слоев, нумерация слоев согласно рис. 1.

При достижении верхней поверхностью слоя с ФИМ температуры более 50°C фазовый переход парафина заканчивался, и температура поверхности ФИМ снова начинала резко увеличиваться. В режиме охлаждения температура поверхности пластины (линия 1) и слоя с ФИМ (линия 2) на начальном этапе равномерно снижались до температуры около 55°C, когда начинался обратный фазовый переход парафина из жидкого состояния в твердое, сопровождающийся выделением тепла и снижением темпа охлаждения слоя с ФИМ по сравнению с пластиной. Фазовый переход в парафине также влиял на изменение температуры верхних теплоизоляционных слоев теплоизоляции, но в более сглаженной форме (линии 3 и 4). Завершение фазового перехода в парафине при нагреве также проявлялось в резком увеличении плотности теплового потока на поверхности слоя с ФИМ, который фиксировал датчик теплового потока. Эксперименты были выполнены для разных расположений слоя с ФИМ.

В докладе будут представлены результаты верификации энтальпийной расчетной модели с использованием полученных экспериментальных данных по изменению тепловых параметров нагрева и охлаждения при разных расположениях слоя с ФИМ.

Список литературы:

- Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F, Mehling H. Review on thermal energystorage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications // Appl. Therm. Eng. 2003. Vol. 23. P. 251–283.
- Григорьев И. С., Дедов А. В., Елецкий А. В. Фазоизменяемые материалы и энергетика // Теплоэнергетика. 2021. №. 4. С. 3-17.

Работа по верификации расчетной модели выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН, эксперименты выполнены при поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-575)

УДК 621.039

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В МОДЕЛИ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ ТОПЛИВНОЙ КАССЕТЫ

Лобанов П.Д., Светоносков А.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Повышение эффективности и безопасности ядерных энергетических установок может быть выполнено за счет оптимизации конструкций существующих энергоблоков атомных электростанций на тепловых нейтронах и создания реакторов нового типа на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями. Для совершенствования атомных энергокомплексов нового поколения требуется проведение детальных измерений локальных гидродинамических характеристик и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок.

Существенной проблемой является ограниченность базы данных о закономерностях теплофизических явлений при течении теплоносителей с малыми числами Прандтля. Из-за сложности экспериментального исследования работы реакторных установок в штатных и аварийных режимах течения теплоносителя моделируют на основе расчетов. Существующие в настоящее время системные теплогидравлические коды основаны на эмпирической информации и теоретических предположениях. Появляется возможность неверного предсказания из-за несовершенства моделей, эффектов нодализации и других факторов. Требуется их доработка и верификация с учетом последних достижений в области экспериментальной гидродинамики и теплообмена.

Для верификации расчетных методов, основанных на современных подходах, в том числе развития методологии создания эффективных RANS-моделей при помощи методов машинного обучения, требуются экспериментальные данные, полученные с использованием различных теплоносителей.

Для снижения гидравлического сопротивления, увеличения запаса до кризиса теплообмена и его интенсификации, повышенное внимание следует уделить локальным течениям в ячейках тепловыделяющих сборок. Важной задачей является изучение периферийных ячеек топливных кассет и течений в области межкассетного зазора [1-3].

В работе проведено экспериментальное исследование в достаточно простой геометрии, состоящей из трех вертикальных имитаторов ТВЭЛов диаметром 10 мм, расположенных в линию с относительным шагом 1.4. Рабочее сечение измерительного участка соответствует двум соседним ячейкам периферийной области ТВС. Длина имитаторов ТВЭЛов 500 мм. Использование простой геометрии позволяет с одной стороны применять различные методы экспериментальных исследований, включая панорамные высокоскоростные оптические методы [4] и скоростную тепловизионную съемку, а с другой стороны использовать методы прямого численного моделирования или вихререзающих методы без существенных вычислительных затрат [5].

Эксперименты проведены в турбулентном режиме течения теплоносителя при числе Рейнольдса, потока, определенном по гидравлическому диаметру $Re=5000$. Имитаторы ТВЭЛов оснащены индивидуальными подводами электрической мощности, что позволяет проводить исследования при неравномерном энерговыделении в соседних ячейках. Это позволяет определить некоторые закономерности межканального обмена с помощью отслеживания распределения температуры в потоке.

Экспериментальная модель оснащена необходимыми системами измерения для температурных полей с помощью тепловизионной съемки и термопарных зондов. Измерения температуры наружной стенки проведены с помощью инфракрасной камеры Fluke T32. Толщина стенки 0.5 мм, внешняя поверхность покрашена черной матовой краской.

Измерения в потоке теплоносителя проведены с помощью термопары, перемещаемой с помощью координатного устройства. Термопарные провода проведены в кожухе из нержавеющей стали внешним диаметром 1,5 мм. Диаметры проводов 0,3 мм, размер кольца 0,6 мм.

Планируется использование полученных экспериментальных данных для создания эффективных численных моделей для описания турбулентного течения теплоносителя при низких числах Прандтля на основе методов машинного обучения.

Список литературы:

1. Дмитриев С.М., Демкина Т.Д., Доронков Д.В., Доронкова Д.С., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования перемешивания теплоносителя в твса с решетками-интенсификаторами // Атомная энергия 2022 Том: 132 С. 200-204
2. Дмитриев С.М., Доронков Д.В., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Пронин А.Н., Рубцова Е.В., Герасимов А.В., Глухова Ю.А., Рязанов А.В. Исследования процесса межкассетного взаимодействия потока теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева № 4 (127) с. 62-71
3. Дмитриев С.М., Герасимов А.В., Добров А.А. и др. Гидродинамика и перемешивание теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с тепловыделяющими сборками различных конструкций // Теплофизика и аэромеханика, 2019, т. 26, № 6, с. 897—912.
4. Шестаков М.В., Токарев М.П. Исследование гидродинамической структуры течения в упрощенной модели периферийной ячейки ТВС // XXXVIII «Сибирский теплофизический семинар, посвященный 65-летию Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН», 29-31 августа 2022, Новосибирск, Россия: Тезисы докладов. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2022. – С. 271.
5. Иващенко В.А., Лобанов П.Д., Яворский Н.И., Токарев М.П., Мулладжанов Р.И. Прямое численное моделирование периферийной и внутренней конфигураций модельной сборки ТВЭЛов // Сибирский журнал индустриальной математики, 2023, т. 94.

*Работа проведена при поддержке
гранта РФФ 22-19-00587*

УДК 621.181

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Мальцев К.И., Гиль А.В., Воронцова Е.С., Абрамов Н.В., Пузырев С.А.

Национальный исследовательский Томский Политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

В настоящее время на отечественных ТЭС помимо существенной выработки паркового ресурса энергетических установок также наблюдается изменение элементного состава поставляемых энергетических углей. Это усугубляет проблемы, связанные со шлакованием поверхностей нагрева котельных агрегатов, а также с повышенными выбросами вредных веществ [1].

Интенсивность процессов шлакования и эмиссии NO_x при горении органического топлива зависит от изменения режимов организации сжигания, т.е. от нагрузки котельного агрегата и от перераспределения топлива и воздуха по горелочным устройствам.

Так на Томской ГРЭС-2 в процессе эксплуатации котельных агрегатов происходит шлакование стен топочной камеры в районе аэродинамического выступа, что в последствие отражается на повышении температуры перегретого пара, и соответственно на надежности работы стенок металла пароперегревателя.

Неоднородность и стохастичность физико-химических процессов, происходящих в объеме топочной камеры при горении полидисперсного твердого топлива, существенно осложняет возможности проведения экспериментальных и аналитических исследований. Применение методов численного моделирования для решения обозначенных задач является наиболее оптимальным.

В представленной работе объектом исследования является котельный агрегат БКЗ-220-100. Компоновка котельного агрегата П-образная, топочная камера призматическая в горизонтальном сечении по осям труб имеет размеры 6656×9536 мм. Периметр топки экранирован трубами испарительной поверхности. Фронтальной и тыльной экраны в нижней части образуют скаты холодной воронки. На боковых стенах встречно установлены шесть вихревых пылеугольных горелочных устройств, по три на каждой стене, компоновка треугольником вершиной вниз.

Для анализа топочных процессов выполнены численные эксперименты на трех нагрузках.

При моделировании принят Эйлерово-Лагранжев подход, позволяющий детально просчитывать траекторию движения отдельных частиц во всем топочном объеме. Соответственно траектория движения частиц угля моделируется моделью дискретных фаз. Силы, действующие на топливную частицу при ее движении в газовом потоке, являются силами сопротивления и силами тяжести.

Трехмерное течение потока газа описывается системой уравнений Навье-Стокса, усредненных по Рейнольдсу, которая состоит из уравнений сохранения массы, импульса, энергии.

Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием наиболее распространенной

двухпараметрической «к-ε» модели турбулентности, также учитывающей влияние движущихся частиц [3].

В результате численного моделирования получены траектории движения частиц, распределения температур, концентраций продуктов горения и др. в объеме топочной камеры. На рисунке 1 представлены результаты численного моделирования при номинальной нагрузке.

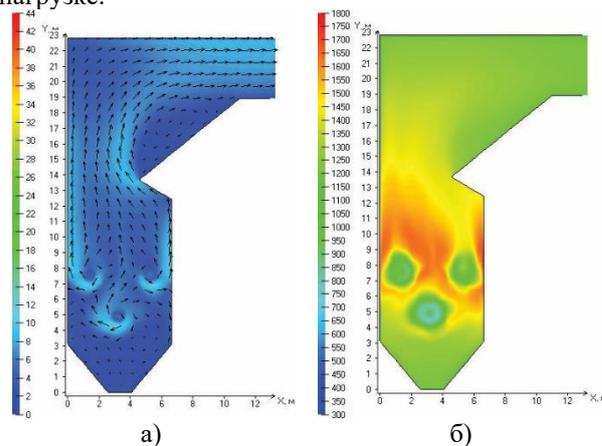


Рис. 1. Результаты численного моделирования:
а) аэродинамическая структура;
б) распределение температурных полей

При анализе результатов моделирования выявлено, что с ростом нагрузки возрастает параметр крутки горелочных устройств и соответственно поток, вытекающий из горелок, широко раскрывается, перераспределяя высокотемпературные потоки вдоль фронтальной и тыльной стен. Таким образом непосредственно у аэродинамического выступа вдоль экранных поверхностей наблюдаются высокотемпературные поля. Соответственно при подаче топлива с более низкоплавкими характеристиками минеральной части топлива приводит к шлакованию в данных зонах.

Список литературы:

1. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Головтеева А.Н., Сиваковский А.М. Алгоритм оптимального выбора наилучших доступных технологий для российских ТЭС // Теплоэнергетика. 2019. №4. С. 60-72.
2. Заворин А.С., Красильников С.В., Обухов С.В., Старченко А.В. Исследования аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310. №1. С. 175-181.
3. Мальцев К.И., Гиль А.В., Заворин А.С., Лебедь Д.В. Численное исследование топочных процессов при сжигании непроектных углей в котле производительностью 220 т/ч // Теплоэнергетика. 2022. №12. С. 73-83.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-29-00274)

УДК 533.6.011.72

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРЯМОТОЧНЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ: УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ СТРУКТУРЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕАЛИЗАЦИИ**Матвеев С.А., Савелова К.Э., Чернышов М.В.**

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская улица, дом 1

Анализ течений с нерегулярным (маховским) отражением скачков уплотнения (в нестационарной постановке задачи – ударных волн) важен при газодинамическом конструировании и оптимизации сверхзвуковых воздухозаборников, сопловых блоков, аппаратов струйных технологий, стартовых комплексов, а также при разработке взрывных технологий и средств подавления поражающего действия взрыва. Согласно [1-3], разнообразные параметры течения (давления торможения, скорости, скоростные напоры и т.д.) в потоках, разделенных тангенциальным разрывом за тройной точкой маховского отражения, могут значительно различаться (при больших сверхзвуковых скоростях – в десятки раз), что может определять проектный облик газодинамических устройств.

В работах [4-6] предложена и теоретически обоснована идея нового комбинированного прямооточного реактивного двигателя с маховским отражением косых скачков уплотнения. Согласно его концепции, течение газа за отраженным скачком, обладающий существенно большим давлением, чем поток за главным (маховским) скачком, используется в термодинамическом цикле классического прямооточного воздушно-реактивного двигателя (цикле Брайтона). В то же время поток за главным скачком обладает значительно более высокой температурой, особенно при полете с большими сверхзвуковыми скоростями, что способствует детонации газовой смеси, благодаря чему он может быть использован в термодинамическом цикле детонационного двигателя (цикле Фикс-Джакобса). Для успешного разделения двух потоков за тройной точкой маховского отражения определить необходимо высоту тройной точки и форму исходящего из неё тангенциального разрыва, а для оценки интегральных характеристик перспективного комбинированного двигателя – форму и размеры всех других газодинамических разрывов в поле течения.

Интерес к методикам быстрой оценки параметров ударно-волновой структуры плоских, в том числе асимметричных течений с маховским отражением заметно возрос в последнее время, что, по-видимому, связано с развитием авиационной и ракетной техники, совершающей полёты с большими сверхзвуковыми скоростями в атмосфере.

Работа, предлагаемая Вашему вниманию, обобщает приближенно-аналитическую модель течения с маховским отражением [7] на случай изменения химического состава газовой смеси и импульсного энергоподвода на главном скачке. На примере сильноперерасширенной струи метано-воздушной смеси изложен алгоритм расчёта параметров ударно-волновой структуры и показаны первичные результаты его применения, а также проведено сравнение с аналогичными данными для сильноперерасширенной струи нереагирующего газа.

Предложенная аналитическая модель позволяет быстро установить форму и размеры образующихся газодинамических разрывов, а также параметры потока в различных областях течения. В качестве примера применения предлагаемой модели исследуются начальные участки струй стехиометрической воздушно-метановой смеси, бедной и стехиометрической воздушно-водородной с большой сверхзвуковой скоростью истечения. Определяется высота тройной точки маховского отражения при наличии изменения химического состава смеси и одновременного импульсного энергоподвода на главном скачке.

В отличие от результатов, представленных в работе [8], в представленном докладе дополнительно обсуждается возможность применения классической модели Зельдовича – Неймана – Дёринга к расчету течения реагирующей газовой смеси за главным (маховским) скачком. Выводятся критерии энергоэффективности двигателей, теоретически реализуемых на основе анализируемых эффектов. Обсуждаются вопросы разделения потоков с различными теплофизическими характеристиками и значения теоретически достижимого термодинамического КПД перспективного двигателя смешанного типа.

Список литературы:

1. Усков В.Н., Чернышов М.В. Особые и экстремальные тройные конфигурации скачков уплотнения // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 4. С. 39-53.
2. Чернышов М.В. Экстремальные тройные конфигурации с отрицательным углом наклона отраженного скачка // Известия вузов. Авиационная техника. 2019. № 2. С. 82-88.
3. Чернышов М.В., Гвоздева Л.Г. Тройные конфигурации скачков уплотнения и бегущих ударных волн // Известия вузов. Авиационная техника. 2022. № 2. С. 87-110.
4. Иванов М.С., Кудрявцев А.Н., Троцюк А.В., Фомин В.М. Способ организации детонационного режима горения в камере сгорания сверхзвукового прямооточного воздушно-реактивного двигателя. Заявка на выдачу патента на изобретение № 2004136236/06 от 10.12.2004, номер патента RU 2285143 C2 от 10.10.2006.
5. Chernyshov M.V., Murzina K.E., Matveev S.A., Yakovlev V.V. Shock-wave structures of prospective combined ramjet engine // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 618. Paper No. 012068. 10 pp.
6. Savelova K.E., Alekseeva M.M., Matveev S.A., Chernyshov M.V. Shock-wave structure of prospective combined jet engine // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V.1959. Paper No. 012043. 9p.
7. Chernyshov M.V., Savelova K.E., Kapralova A.S. Approximate Analytical Models of Shock-Wave Structure at Steady Mach Reflection // Fluids. 2021. Vol. 6. Issue 9. Paper No. 305. 18 p.
8. Chernyshov M.V., Savelova K.E. An Approximate Analytical Model of a Jet Flow with Mach Reflection and Pulsed Energy Supply at the Main Shock // Fluids. 2023. Vol. 8. Issue 4. Paper No. 132. 16 p.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации, FZWF-2020-0015*

УДК 621.9

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПОЛОСТИ НАД РАСПЛАВОМ

Мельников И.А., Шмельков Г.Б., Голубев М.А., Великанов А.В.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

В ходе тяжелой аварии на АЭС с реактором типа ВВЭР происходит разогрев и расплавление материалов активной зоны с образованием ванны расплава, интенсивно взаимодействующей с элементами оборудования АЭС. Расплав представляет собой нагретую свыше 2000 К вязкую жидкость с объемным тепловыделением, состоящую из расплавленных компонент активной зоны. При таких температурах вклад теплопередачи за счет излучения с поверхности расплава в общий теплообменный процесс системы становится существенным. Часто в современных тяжеловарийных кодах теплообмен излучением в системах со сложной геометрией и наличием оптически-непрозрачной среды в полости над расплавом моделируется с упрощениями, позволяющими описать процесс лишь качественно.

В данной работе изложены подходы к моделированию теплообмена излучением в полости над расплавами, реализованные в модуле THERA (Thermal Radiation) пакета прикладных программ TSAR (Toolkits for Severe Accident Research). Модуль THERA осуществляет расчет теплообмена излучением в полости над расплавом для задач со сложной геометрией, включая поверхности, затеняющие друг друга с учетом поглощения в парогазовой среде в расчетной области.

В качестве основного расчетного метода был выбран net-radiation метод [1]. В его основе лежит понятие углового коэффициента – геометрическая характеристика расчетной области, которая определяет долю излучения, испущенного поверхностью 1 и падающего на поверхность 2:

$$\varphi_{12} = \frac{S_1 S_2 \cos(\beta_1) \cos(\beta_2)}{\pi |\vec{R}_{12}|^2} \quad (1)$$

где S_1, S_2 – площади поверхностей 1 и 2 соответственно, R_{12} – вектор, соединяющий барицентры поверхностей 1 и 2, β_1, β_2 – углы между нормальными к поверхностям 1 и 2 и вектором \vec{R}_{12} .

Расчетная область разбивается на N конечных треугольных площадок, для каждой пары площадок рассчитывается угловой коэффициент. Учет сложной геометрии расчетной области обеспечивается за счет высокой степени дискретизации ограничивающих задачу поверхностей. В условиях оптически-прозрачной среды на каждой k -й площадке записываются условия баланса плотностей тепловых потоков излучения:

$$q_{\text{рез},k} = q_{\text{эфф},k} - q_{\text{пад},k} \quad (2)$$

где $q_{\text{рез},k}$ – плотность результирующего потока излучения, $q_{\text{эфф},k}$ – плотность эффективного теплового потока излучения, исходящего с k -й поверхности, как сумма плотности излучающего теплового потока излучения с площадки k и плотности отраженного теплового потока излучения, $q_{\text{пад},k}$ – плотность падающего теплового потока излучения на поверхность k .

Моделирование радиационного теплообмена возможно в замкнутой и незамкнутой расчетных областях.

В работе выполнена адаптация net-radiation метода к моделированию радиационного теплообмена в условиях наличия поглощающей и излучающей газовой среды в полости над расплавом. В качестве основной модели расчета радиационных свойств газовых смесей была выбрана модель суммы взвешенных серых газов на основе спектральных линий (spectral-line based weighted sum-of-gray-gases, SLW) [2], основанная на глобальной функции распределения поглощения.

В работе проведено моделирование лучистого теплообмена модулем THERA с поверхности расплава на конструкции шахты реактора на АЭС с реактором ВВЭР – 1000 в рамках внекорпусной стадии тяжелой аварии. В качестве исходных данных по составу расплава и его теплофизическим характеристикам используются результаты моделирования обобщенного сценария гипотетической тяжелой аварии на АЭС с реактором ВВЭР – 1000 кодом СОКРАТ-В1/В2. В ходе взаимодействия расплава активной зоны с бетонными конструкциями шахты реактора выделяются газы H_2O, CO_2, CO и H_2 . В рамках работы была показана важность корректного учета поглощения в парогазовой среде. Также в работе было проанализировано различие результатов моделирования радиационного теплообмена для двухмерной (осесимметричной) и трехмерной топологии задачи. В работе представлены данные по тепловым потокам к элементам конструкции шахты реактора, обусловленные радиационным теплопереносом.

Список литературы:

1. Hottel H.C., Sarofim A.F., Radiative Transfer / NY, McGraw-Hill Book Company - 1967;
2. Denison M. K. and Webb B. W. (1993a), A spectral line-based weighted-sum-of-gray-gases model for arbitrary RTE.
3. solvers// ASME J. Heat Transfer, 1993a (115) pp. 1004–1012.

УДК 536.524

ЗАВИСИМОСТЬ МОЩНОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЦЕВОЙ СИСТЕМЫ КУЭТТА-ТЭЙЛОРА

Миськив Н.Б., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Мамонов В.Н., Терехов В.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В [1] авторами было предложено рассмотреть в качестве устройства для прямого преобразования механической энергии в тепло генератор, в котором два коаксиальных встречно вращающихся многощелевых ротора, образуют круговую систему Куэтта-Тэйлора, заполненную вязкой рабочей жидкостью.

В [2,3] была сделана попытка экспериментального исследования структуры течения в многоцилиндровой системе Куэтта-Тэйлора с помощью прямых измерений величины момента сопротивления вращению роторов теплогенератора, амплитуды и частоты пульсаций этого момента в зависимости от вязкости рабочей жидкости и скорости вращения роторов. Экспериментальное оборудование и методы измерения подробно описаны в работах [1,2,3].

Анализ зарегистрированных осциллограмм и измеренных амплитудно-частотных спектров момента сопротивления вращению роторов теплогенератора дает возможность связать наблюдаемое поведение этого момента со структурой течения в кольцевом течении Куэтта-Тэйлора, описанным в [4].

В предлагаемой работе обсуждается методика исследования структуры течения в многоцилиндровой кольцевой системе Куэтта-Тэйлора, основанная на анализе экспериментально измеренных осциллограмм и амплитудно-частотных спектров пульсаций момента сопротивления вращению роторов теплогенератора. Особое внимание уделено влиянию на полученные результаты конструктивных параметров и погрешностей изготовления многоцилиндровых встречно вращающихся коаксиальных роторов экспериментальной установки.

Методика обработки и анализа экспериментально полученных осциллограмм и амплитудно-частотных спектров пульсаций момента сопротивления вращению роторов теплогенератора отработана на экспериментальном макете однокольцевого теплогенератора с вращающимся внутренним и неподвижным внешним цилиндрами. Диаметр вращающегося цилиндра 0,32 м, высота цилиндра 0,05 м. Концентрический зазор между вращающимся и неподвижным цилиндрами составлял 11 мм. Весь внутренний объем конструкции заполнялся рабочей жидкостью – водоглицериновым раствором с массовой долей глицерина 90%. Вязкость и плотность водоглицеринового раствора определялись его температурой и соотношением концентраций воды и глицерина. Эксперименты были проведены в диапазоне частот вращения внутреннего цилиндра $f = (2-7)$ Гц при изменении кинематической вязкости рабочей жидкости в диапазоне $\nu = (94-37) \cdot 10^{-6}$ м²/с, что соответствовало изменению числа Рейнольдса от 200 до 2000.

Было исследовано влияние эллипсности цилиндров системы Куэтта-Тэйлора и промышленных помех на форму амплитудно-частотных спектров пульсаций момента сопротивления вращению внутреннего цилиндра.

При работе экспериментальной установки отклонение ширины кольцевого зазора между цилиндрами от среднего значения 11 мм изменялось в пределах $\pm 1,4\%$. На рис. 1 приведен пример амплитудно-частотного спектра, на котором отмечены его особенности, связанные эллипсностью кольцевой системы экспериментальной установки и промышленными помехами.

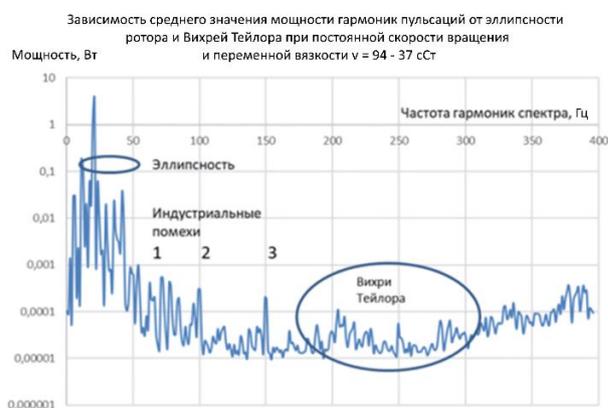


Рис. 1. Пример амплитудно-частотного спектра пульсаций момента сопротивления вращению внутреннего цилиндра

В результате проведенных исследований показано, что эллипсность цилиндров системы Куэтта-Тэйлора экспериментальной установки и промышленные помехи заметно искажают форму амплитудно-частотных спектров пульсаций момента сопротивления вращению внутреннего цилиндра. Но эти искажения поддаются идентификации и могут быть учтены при исследовании структуры течения в многоцилиндровых кольцевых системах Куэтта-Тэйлора в области ламинарных и переходных значений чисел Рейнольдса.

Список литературы:

1. A.F. Serov, A.D. Nazarov, V.N. Mamonov, V.I. Terekhov. Experimental investigation of energy dissipation in the multi-cylinder Couette-Taylor system with independently rotating cylinders // Applied Energy 251 (2019) 113362.
2. Мамонов В.Н., Миськив Н.Б., Назаров А.Д., Серов А.Ф., Терехов В.И. Генерация тепла в мультицилиндровой системе Куэтта-Тэйлора // Теплофизика и Аэромеханика. 2019, Т. 26, №5, С. 729-739.
3. А.Ф. Серов, В.Н. Мамонов, А.Д. Назаров. Энергетика пульсаций течения Куэтта-Тэйлора в зазорах оппозитных многоцилиндровых роторов // Ученые записки Казанского университета. Физико-математические науки. 2017. Т. 159, Кн. 3, С. 364-373.
4. C. David Andereck, S.S. Liu and Harry L. Swinney. Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders//J. Fluid Mech. (1986), vol.164, pp. 155-183.

УДК 621.57

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ БРОМИСТОЛИТИЕВЫХ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ (АБТТ) ПОВЫШАЮЩЕГО ТИПА В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Мухин Д.Г.^{1,2}, Степанов К.И.¹ Елистратов С.Л.²

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Абсорбционные бромистолитиевые термотрансформаторы (АБТТ) широко используются в мире как теплоиспользующие холодильные машины и тепловые насосы. Холодильные машины (АБХМ) используются для выработки холода положительных температур. Тепловые насосы (АБТН) используются для утилизации сбросного тепла с нагревом в системах теплоснабжения и промышленности. АБТН разделяются на два типа – понижающий (тип I) и повышающий (тип II). АБТН понижающего типа применяются для систем отопления и горячего водоснабжения. Они утилизируют тепло воды оборотных систем предприятий, ТЭЦ, и могут использоваться, где требуется одновременно охлаждать технологическое оборудование и нагревать воду. АБТН повышающего типа применяются в основном в производственных процессах (химическая, пищевая, бумажная промышленность). В качестве источника энергии используется обычно конденсат либо вторичный пар производств (преимущество этих АБТН в том, что для их работы не используется высокопотенциальный греющий источник как в АБТН I типа). Тепловой продукт (источник нагрева) – технологический пар либо нагреваемая жидкость с температурой до 120 °С.

В России имеется в наличии большое количество источников геотермальной воды, температурный потенциал которых составляет 40 – 45 °С. Эти источники могут находиться в труднодоступных районах, где в случае организации строительства посёлков и малых городов, будут рассматриваться вопросы их использования для теплоснабжения. Однако температурный потенциал данных источников недостаточен для отопления и, особенно, для горячего водоснабжения в условиях сильных морозов. В соответствии с правилами и нормами технической эксплуатации жилищного фонда утвержденными постановлением Госстроя РФ от 27.09.2003 № 170, температура горячей воды в закрытых системах ГВС не должна быть ниже 50 °С. Такая высокая температура воды ГВС объясняется тем, что воду необходимо обеззаразить.

Для систем отопления с геотермальными источниками предлагается рассмотреть возможность применения АБТН повышающего типа с целью повышения температуры воды отопления и ГВС. В данном случае АБТН производит утилизацию теплоты геотермальной воды. Для АБТН повышающего типа геотермальная вода используется в качестве источника энергии и здесь происходит её охлаждение. Нагреваемая вода циркулирует через абсорбер, где может быть нагрета

до 67°С. Кроме этого, для АБТН требуется охлаждающий источник низкотемпературного потенциала. В зимних условиях, на большей части территории РФ, охлаждающую жидкость с температурой до минус 4 °С, можно обеспечить аппаратами воздушного охлаждения (АВО). На рисунке 1 показаны температурные параметры внешних теплоносителей АБТН

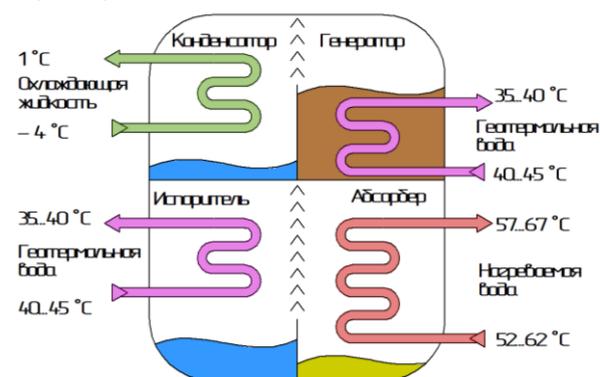


Рис. 1 Температурные параметры теплоносителей АБТН повышающего типа в системе отопления и ГВС с утилизацией тепла геотермальной воды.

Энергетическая эффективность АБТН повышающего типа оценивается тепловым коэффициентом (за рубежом: COP – coefficient of performance), который показывает отношение производимого тепла высокого потенциала к количеству утилизируемого тепла.

$$\eta = \frac{Q_h}{Q_u},$$

где: Q_h – теплопроизводительность АБТН, Вт; Q_u – утилизируемая теплота, подводимая к испарителю и генератору АБТН, Вт.

Оценочные расчёты показывают, что среднее значение теплового коэффициента АБТН, в условиях приведённых на рисунке 1, составляет около 0,5.

Таким образом, АБТН повышающего типа можно использовать для отопления и ГВС, охлаждая геотермальную воду с начальной температурой 40-45 °С. В качестве отопительных приборов в жилых зданиях целесообразно использовать фэнкойлы. Дальнейшим этапом работ предполагается экспериментальная проверка теоретических значений тепловых коэффициентов АБТН.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800229-1)

УДК 620.9

СЖИГАНИЕ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ХОЛОДНЫМ ВОЗДУХОМ**Мухина М.А., Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В ИТ СО РАН исследуется способ сжигания жидкого углеводородного топлива распыляемого нагретой струей воздуха или перегретого водяного пара [1]. Отличительной особенностью такого метода является то, что он основан на взаимодействии высокоскоростной струи газа с каплей топлива, что обеспечивает качественное диспергирование различных видов топлива и может применяться даже для сжигания жидких горючих отходов. При этом в работах было показано, что использование перегретого водяного пара позволяет значительно снизить содержание вредных выбросов в продуктах сгорания, по сравнению с другими типами разбавителей. Например, использование перегретого водяного пара позволяет уменьшить концентрацию оксидов азота в отработанных газах до 50% при высокой полноте сжигания низкокачественного топлива. В работах такой эффект связывают со снижением температуры пламени, за счет чего снижается образование «термического» NO_x, а также протекания паровой газификации, что позволяет сохранить высокую полноту сжигания топлив. Такой способ сжигания является одним из перспективных путей утилизации низкокачественных топлив и производственных отходов, которые могут быть подвержены сжиганию (отработанных масел и др.).

Однако, кинетика горения жидких углеводородов, особенно некондиционных, при впрыске пара до сих пор остается малоизученной. Поэтому в рамках настоящей работы проведено изучение характеристик горелочного устройства при замене перегретого водяного пара или нагретого воздуха (как распыляющего вещества) на холодный сжатый воздух для анализа влияния, собственно, наличия пара и температуры распылителя.

В настоящей работе исследуется сжигание жидкого углеводородного топлива на распылительном горелочном устройстве, схема которого представлена на Рис. 1.

Исследования проведены на экспериментальном огневом стенде [2], основными элементами которого являются: распылительное горелочное устройство, регулируемая система подачи топлива и сжатого воздуха, измерительное оборудование. На проточном

калориметре с помощью газоанализатора Testo 350 были получены тепловые и экологические характеристики работы горелочного устройства при распыле жидкого топлива струей холодного воздуха в широком диапазоне режимов по расходу топлива и расхода воздуха.

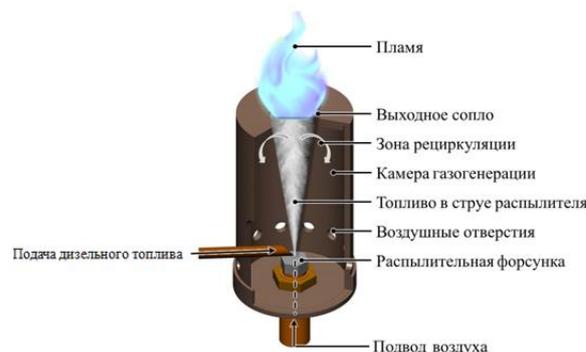


Рис 1. Схема горелочного устройства.

Данная работа является частью цикла исследований по сжиганию жидких углеводородов в присутствии перегретого водяного пара [2,3], направленного на создание научно-экспериментальной базы для создания энергоэффективного и экологически безопасного способа сжигания жидких углеводородных топлив (в том числе, некондиционных, загрязненных и низкокачественных жидких топлив).

Список литературы:

1. Anufriev I.S., Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Experimental investigation of size of fuel droplets formed by steam jet impact // Fuel. 2021. Vol. 303. Art. No.121183. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121183
2. Anufriev I.S., Alekseenko S. V., Sharypov O. V., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion in a direct-flow evaporative burner with superheated steam supply // Fuel. 2019. Vol. 254. P. 115723.
3. Anufriev I.S., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // Fuel Processing Technologies. 2019. Vol. 192. P. 154–169.

УДК 536.42:536.248.2

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗДАНИЯХ С ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ

Низовцев М.И., Стерлягов А.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

К фазоизменяемым материалам относят материалы, в которых в результате тепловых процессов происходят обратимые фазовые переходы с поглощением или выделением тепловой энергии.

Фазоизменяемые материалы (ФИМ) за счет высоких значений теплоты фазовых переходов от 90 до 330 кДж/кг находят широкое применение в различных технических приложениях. Все активнее начинают применять ФИМ в строительной отрасли. Использование ФИМ в конструкциях зданий относится к пассивным методам повышения их энергоэффективности, наряду с утеплением и использованием естественной и ночной вентиляции [1].

Здания со стенами из легких теплоизоляционных материалов обычно подвержены резким колебаниям температуры воздуха в помещениях в сезоны отопления и кондиционирования из-за отсутствия достаточной тепловой инерции их ограждающих конструкций, что приводит к высокому потреблению энергии для обеспечения зоны комфортной температуры. Применение материалов с фазовым переходом было предложено в качестве многообещающего решения для контроля теплового состояния помещений в зданиях. В литературе имеются противоречивые данные по оптимальному расположению ФИМ в конструкциях стен зданий из легких теплоизоляционных материалов [2]. Кроме того, не исследовано влияние теплового режима помещений, ширины диапазона фазовых переходов ФИМ на выбор места расположения ФИМ. Целью данной работы является получение ответов на эти вопросы.

В докладе представлены результаты расчетного исследования эффективности применения ФИМ в конструкциях стен из легких теплоизоляционных материалов для снижения нагрева помещений в летний период. Использована энтальпийная модель расчета теплообмена в многослойных материалах. В качестве одного из слоев рассмотрен слой макрокапсулированного ФИМ, который располагался в различных зонах легкого теплоизоляционного материала. В качестве граничных условий с наружной стороны стены были выбраны суточные периодические колебания температуры воздуха относительно температуры 25°C с амплитудой 10°C, $t_{в}=25+10\sin(2\pi t/\tau)$, где t – текущее время, а τ – суточный период. С внутренней стороны рассмотрены два разных граничных условия. Первое условие: кондиционирование помещения при постоянной температуре внутреннего воздуха 21°C и второе условие: периодические колебания температуры внутреннего воздуха синфазно с колебаниями наружного воздуха около температуры 21°C с амплитудой 5°C, $t_{в}=25+5\sin(2\pi t/\tau)$.

В результате расчетов определено влияние местоположения тонкого слоя ФИМ, в качестве которого использован парафин с различными температурами и шириной фазового перехода в легкой теплоизоляции из экструзионного пенополистирола толщиной 100 мм. На рис.1 в качестве примера показано снижение в 14 раз амплитуды колебаний плотности теплового потока на внутренней поверхности стены при установке в центральной ее зоне слоя ФИМ толщиной 4% от общей толщины конструкции.

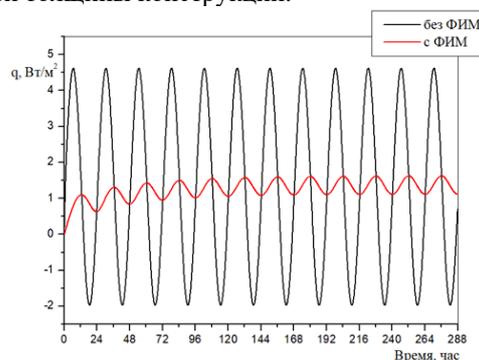


Рис. 1. Сравнение плотности теплового потока на внутренней поверхности без ФИМ и с ФИМ.

Другой важный результат, полученный при расчетах, заключается в значительной задержке, которая составила 8 часов, между временем максимальной температуры воздуха на улице и временем максимальной плотности теплового потока на внутренней поверхности стены в режиме кондиционирования воздуха в помещении при использовании ФИМ. Данная особенность при применении ФИМ в стенах зданий позволит снизить потребление электроэнергии при пиковом ее потреблении на кондиционировании летом в дневное время.

Список литературы:

1. Pappu Arumugam, Velraj Ramalingam, Pandiyarajan Vellaichamy. Effective PCM insulation, natural and/or night ventilation techniques to enhance the thermal performance of buildings located in various climates – A review// Energy & Buildings. 2022. V.258. 111840.
2. Amirreza Fateh, Felix Klinker, Michael Brütting, Helmut Weinsläder, Francesco Debia. Numerical and experimental investigation of an insulation layer with phase change materials (PCMs)// Energy and Buildings. 2017. V.53. С. 231–240.

Работа выполнена при поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-575)

УДК 621.039.58

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ «ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ» ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЗПА

Николаева А.В., Астахов В.В., Литышев А.В., Пантюшин С.И.

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»,

142103, Россия, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21

Управление авариями на АЭС – сложный и наукоёмкий процесс. Эксплуатационный персонал в условиях значительного стресса должен следовать требованиям многотомных инструкций. При этом для поздних стадий аварии, значительно сокращается номенклатура датчиков, способных дать достоверную информацию о ходе аварии (особенно актуально для поздних стадий аварии, когда температура теплоносителя значительно выше номинальных параметров). Это приводит к возрастанию рисков совершения ошибок персоналом и увеличению времени реагирования. Эти проблемы можно решить с помощью применения «искусственного интеллекта» (ИИ).

Перспективными и практически реализуемыми направлениями применения технологии ИИ в части диагностики ЗПА, включая ТА, можно считать:

1) Идентификацию отклонений контролируемых параметров от условий нормальной эксплуатации. Для этого рационально применять технологию «автокотировщик» [1], обучаемую на эксплуатационных данных со станции. Такой подход позволяет практически моментально определить наличие отклонений от нормальной эксплуатации и предпринять действия по предотвращению проектной аварии (ПА). А также, в рамках разрабатываемой концепции виртуальных аварийных инструкций по управлению ЗПА и ТА – сигнал от такой модели ИИ можно рассматривать, как условие для запуска диагностики по задачам 2 - 7;

2) Идентификацию типа исходного события, приводящего к ЗПА (включая ТА): потеря электроснабжения, течь первого контура, течь второго контура, течь из первого контура во второй и др. На данный момент, основными являются симптомно-ориентированные подходы, которые для медленнопротекающих процессов дают значительные задержки по времени при диагностике исходного события. В данном случае, преимущество ИИ заключается в скорости диагностики ситуации. Особенно это касается диагностики медленнопротекающих процессов, характерных, например для некомпенсируемых «малых течей»;

3) Для аварий, предполагающих наличие некомпенсируемых течей

- определение локализации течи (номер петли/парогенератора, положение места течи на трубопроводе/оборудовании);

- оценка диаметра течи;

4) Прогнозирование времени до наступления ключевых событий (превышение максимального проектного предела повреждения твэлов, проплавление корпуса реактора и др.). Наличие таких знаний позволит персоналу оценить количество времени, доступного для выполнения действий по управлению тяжелой аварией;

5) Оценка теплогидравлических параметров РУ, для которых не предусмотрено наличие аварийных контрольно-измерительных приборов (АКИП) на основе имеющихся данных с АКИП. Например, определение уровня теплоносителя в реакторе, максимальной температуры оболочек твэлов и др. Особенно, применение ИИ актуально в данном аспекте на стадии ТА;

6) Прогнозирование хода аварии на основе имеющихся данных по динамике развития аварии (динамика изменения температур, уровней, давлений и др.)

7) Определение оптимальной инструкции на основе 1 - 6.

Перечисленные задачи решаются путем создания системы моделей ИИ, предобученных на расчетных, экспериментальных и эксплуатационных данных. Каждая из этих моделей решает узкоспециализированную задачу классификации, регрессии, автокодирования и др.

В рамках данного исследования на основе ИИ разработаны модели для решения задач 2 - 4 и приведено описание подходов для решения задач 1, 5 и 6. Для обучения моделей ИИ использованы наборы исходных данных, полученных на основе численных исследований для ВВЭР-1000 с применением расчетного кода, СОКРАТ-В1/В2. Для всех рассмотренных исходных событий постулируется наложение потери электроснабжения.

Номенклатура рассматриваемых параметров аналогична АКИП (20-21 параметр).

Разработанные модели позволяют по данным измерений АКИП на интервале 4 - 8 с определять:

1) Тип исходного события (средняя точность модели – 99,6 %, время расчета – 13 мс):

- «Течь из первого контура»;

- «Течь из второго контура»;

- «Течь из первого контура во второй».

2) Положение места течи (средняя точность модели – 96%, время расчета – 14 мс)

3) Диаметр течи (средняя ошибка – 0,02 м, время счета – 8 мс).

В рамках исследования разработана концепция виртуальных аварийных инструкций по управлению ЗПА и ТА (РУЗА-П и РУЗА-Т), позволяющая проводить диагностику и выдавать рекомендации персоналу по управлению аварией в реальном времени. В основе концепции заложена система взаимосвязанных моделей ИИ с учетом данных со станции о работоспособности оборудования и о теплогидравлических параметрах, доступных на рассматриваемой стадии аварии.

Список литературы:

1. Ng, Andrew Y. CS294A. Sparse Autoencoders. Lecture notes, 72, 2011. pp 1- 19.

УДК 621.039.5:(532 536) БН

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ «НАТРИЙ-НАТРИЙ» ПЕРСПЕКТИВНОГО РЕАКТОРА БН

Пахолков В.В., Низамутдинов В.Р., Дмитриева И.В., Фадеев И.Д., Рогожкин С.А., Сметанин Т.Р.

АО «ОКБМ Африкантов»,
603074, Россия, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15

В докладе рассмотрены результаты трёхмерного численного моделирования теплогидравлических процессов в теплообменнике «натрий-натрий» перспективного реактора на быстрых нейтронах (БН).

Теплообменник размещен в корпусе реактора и предназначен для передачи тепла от «горячего» натрия, циркулирующего в межтрубном пространстве, к «холодному» натрию, циркулирующему внутри труб. Перед входными окнами теплообменника имеет место температурное расслоение теплоносителя из-за неполного перемешивания разнотемпературных потоков в камере на выходе из активной зоны реактора. В самом теплообменнике в районе его входных и выходных окон реализуется сложное продольно-поперечное течение теплоносителя, которое приводит к неравномерному распределению расхода теплоносителя в межтрубном пространстве и, как следствие, к неравномерному распределению температуры и эффективности теплообмена по высоте и радиусу трубного пучка.

Численное моделирование теплогидравлических процессов выполнено с использованием программного комплекса (ПК) FlowVision [1] со стандартной $k-\varepsilon$ моделью турбулентности [2] и моделью турбулентного теплопереноса в жидких металлах LMS [3].

Для обоснования представительности численного моделирования трубного пучка теплообменника БН выполнены верификационные расчёты по ПК FlowVision элементарных теплообменников, с соответствующими штатной конструкции геометрическими характеристиками трубного пучка. Результаты расчетов сравнивались с аналитическими решениями, полученными с использованием экспериментальных данных по коэффициентам теплоотдачи. С учетом неопределенностей этих данных погрешность расчёта по ПК FlowVision мощности и среднесмешанных температур на выходе из теплообменников составляет от 0,3 до 3,6%.

Для определения параметров потока на входе в теплообменник выполнено трёхмерное численное моделирование 1/4 части реактора с упрощенной моделью теплообменника, в которой трубный пучок моделируется пористым телом с анизотропным гидравлическим сопротивлением и равномерно распределенной мощностью стока теплоты.

Для детального исследования процессов в теплообменнике была разработана секторная расчетная модель, которая представляет собой 1/12 часть штатного теплообменника и включает «горячий» натрий в межтрубном пространстве, 455 теплопередающих трубок штатной длины, «холодный» натрий в трубках,

элементы дистанционирующих поясов, входную и выходную решётки (см. рис. 1). Гидравлическое сопротивление дистанционирующих поясов учитывалось за счёт локального уменьшения площади проходного сечения по межтрубному пространству.

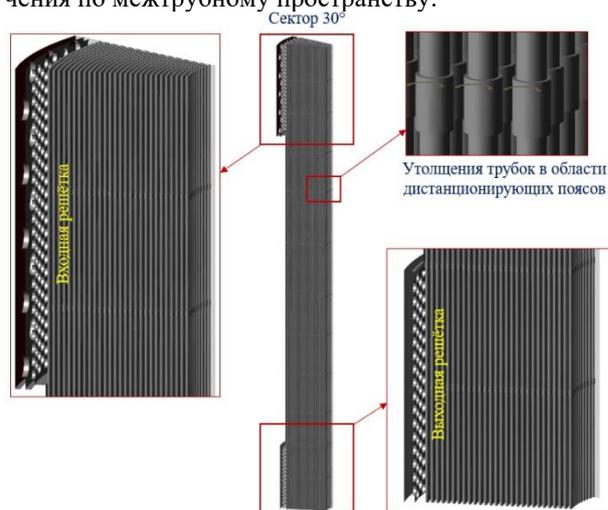


Рис. 1 – Расчетная модель теплообменника.

Распределение расхода «холодного» натрия по трубкам задавалось по результатам экспериментальных исследований на модели.

В результате численного моделирования в ПК FlowVision получено, что мощность теплообменника с запасом превышает проектное значение. Отличие по среднесмешанным температурам «горячего» и «холодного» натрия на выходе теплообменника в сравнении с соответствующими проектными значениями не превышает 1%. Отличие коэффициентов теплоотдачи на участке продольного обтекания трубок от проектных значений составило 4 % со стороны «горячего» натрия и 14 % со стороны «холодного» натрия, что не превышает погрешность проектных соотношений 20 %. В районе входного и выходного окон теплообменника происходит существенное перераспределение мощностей между участками трубного пучка.

Список литературы:

1. Аксенов А.А. FlowVision: Индустриальная вычислительная гидродинамика // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т.9. №1. С. 5-20.
2. Жлуктов С.В., Аксёнов А.А., Карасёв П.И. Моделирование байпасного ламинарно-турбулентного перехода в рамках $k-\varepsilon$ подхода // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 6. С. 879-888.
3. Рогожкин С.А., Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Осипов С.Л., Сазонова М.Л., Фадеев И.Д., Шепелев С.Ф., Шмелев В.В. Разработка модели турбулентного теплопереноса для жидкотеплоносителя и её верификация // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т.7. № 3. С. 306-316.

УДК 536.24

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИ ТЕПЛООБМЕНЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ В ТРУБАХ РАЗНОГО ДИАМЕТРА

Печенегов Ю.Я.¹, Косов В.А.², Косов М.А.²

¹ Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., 413100, Россия, Энгельс, Саратовской обл., пл. Свободы, 17

² Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Россия, Саратов, ул. Политехническая, 77

Одной из задач, решаемых при разработке теплообменных аппаратов, является определение наилучших конструктивных и режимных характеристик, обеспечивающих минимальные площадь поверхности нагрева и затраты мощности на прокачивание теплоносителей при заданных температурных условиях работы и передаваемом тепловом потоке. В настоящей работе данную задачу рассматривали для устройств с трубчатой поверхностью нагрева.

При проведении анализа использовались уравнение теплообмена для турбулентного течения в каналах

$$Nu = 0,021Re^{0,8} Pr^{0,43} \quad (1)$$

и уравнение для коэффициента сопротивления трения потока теплоносителя

$$\xi = 0,184Re^{0,2}, \quad (2)$$

где Nu , Re и Pr – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля соответственно.

Передаваемый тепловой поток определяется по выражению

$$Q = 0,785ndc_p\mu\delta t Re, \quad (3)$$

где n – число труб, параллельно включенных по теплоносителю; d – диаметр труб; c_p и μ – теплоемкость и динамический коэффициент вязкости теплоносителя соответственно; $\delta t = |t'' - t'|$ – перепад температур теплоносителя в трубе (t' и t'' – температуры входа и выхода).

С учетом уравнений (2) и (3), для длины трубы получим

$$l = 11,37 d \frac{\delta t}{\Delta t} Re^{0,2} Pr^{0,57}, \quad (4)$$

где Δt – средняя разность температур стенки трубы и теплоносителя.

Учитывая выражения (2) и (5), для мощности, затрачиваемой на прокачивание по трубам теплоносителя, можно записать

$$N = 0,82w^2 d \mu \frac{\delta t}{\Delta t} Re Pr^{0,57}, \quad (5)$$

где w – скорость движения теплоносителя.

Уравнения (4) и (5) использовались для определения относительной площади поверхности нагрева F/F^* и относительной мощности, затрачиваемой на прокачивание теплоносителя, N/N^* при теплообмене в трубах разного диаметра. Здесь и далее индекс «*» показывает, что параметр для принятого базового варианта, имеющего $n = 1$. Площадь поверхности нагрева

$$F = 0,785dln, \quad (6)$$

где n определяется из уравнения (3) при $Q = Q^*$.

В качестве теплоносителя рассматривали воздух, скорость движения которого в трубах соответствовала интервалу варьирования чисел Re от 2500 до $1,6 \cdot 10^5$. Принимали $\delta t = \Delta t = t_{cp} = 50$ °С, где t_{cp} – средняя температура потока воздуха в трубах. Базовым вариантом для сравнения принимали трубу с $d = 0,04$ м.

Расчеты показали, что для принятых условий сравнения затрачиваемая на прокачивание теплоносителя мощность существенно уменьшается при использовании труб малого диаметра (см. рис. 1а). При уменьшении d уменьшается и площадь поверхности нагрева, необходимая для передачи потока теплоты $Q = Q^* = idem$ при $w = idem$ (см. рис. 2б). Скорость потока воздуха в пределах рассмотренного интервала ее изменения не оказывает влияния на зависимости $N/N^* = f(d)$ и $F/F^* = f(d)$.

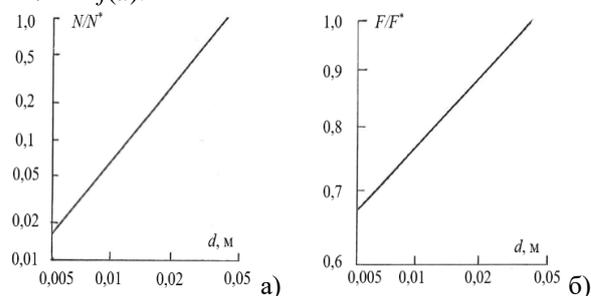


Рис. 1. (а) Зависимость N/N^* от d и (б) Зависимость F/F^* от d .

Для сравнительных оценок теплогидравлической эффективности теплообмена использовался энергетический к.п.д. процесса [1]

$$\eta = 1 - \frac{N}{Q}. \quad (7)$$

Расчеты по уравнению (7) с учетом выражений (3) и (5) показали, что η тем выше, чем меньше диаметр d труб. Различие η для труб с разным d возрастает с увеличением w . Так, например, для базового варианта с $d = 0,04$ м величина $\eta = 0,994$ при $w = 18$ м/с и $\eta = 0,977$ при $w = 36$ м/с, а для труб диаметром $d = 0,005$ м при их количестве $n = 64$ и при данных скоростях движения теплоносителя $\eta \geq 0,999$.

Полученные результаты являются характерными и подтверждают отмечаемую рядом авторов повышенную теплогидравлическую эффективность теплообмена в каналах с малым поперечным размером [2]. Для рассмотренных условий предпочтительными являются компоновочные решения поверхности нагрева из труб малого диаметра, имеющих меньшую длину, необходимую для нагрева (охлаждения) теплоносителя до заданной температуры.

Список литературы:

1. Печенегов Ю.Я. Сравнительные теплогидравлические и энергоэкономические характеристики теплообмена в круглых и прямоугольных каналах при ламинарном и турбулентном режимах течения теплоносителя // ХНГМ. 2022. № 2. С. 12- 15.
2. Особенности гидродинамики и теплообмена при течении в микроканальных технических устройствах / Е.П. Валуева, А.Б. Галяев, А.В. Клименко. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 140 с.

УДК 620.97

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Половников В.Ю., Шелемехова С.Д.

Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Томская область заинтересована в развитии альтернативных генерирующих объектов, которые повысят надежность и доступность теплоснабжения. Известно, что в поселке Белый Яр Верхнекетского района Томской области еще в 1961 году пробурена артезианская скважина глубиной в 2,5 км. Температура геотермального источника составляет более 70 градусов [1].

Целью работы является численный анализ тепловых режимов месторождений геотермальных источников энергии в Томской области.

Рассматривается один из наиболее типичных в РФ видов двухколонной геотермальной скважины: колонны, кондуктор и направления которой выполнены из цемента. На рис 1 приведено схематичное изображение рассматриваемого объекта.

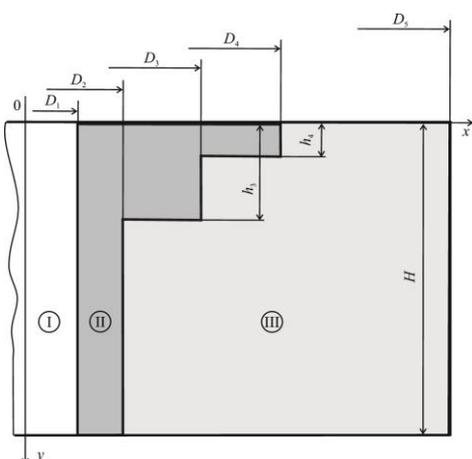


Рис. 1. Схема области решения: I – энергоноситель; II – колонны, кондуктор и направления; III – порода

В упрощенном виде анализ тепловых режимов геотермальных месторождений сводится к решению нестационарной двумерной задачи теплопроводности с соответствующими краевыми условиями.

На границе D_1 выставлялись граничные условия первого рода, а на границе D_5 – второго. На поверхностях контакта между слоями вводились условия идеального теплового контакта. На поверхности $y=0$ осуществляется конвективный теплообмен, а при $y=H$ считалось, что тепловой поток равен нулю.

Сформулированная задача решена методом конечных разностей, при следующих исходных данных: $D_1=168$ мм; $D_2=299$ мм; $D_3=473$ мм, $D_4=630$ мм, $D_5=50$ м, $h_3=650$ м, $h_4=10$ м, $H=2500$ м. Значение температуры в начальный момент времени принималось равным 272,7 К. Температура наружной среды составляла 273,15 К, а коэффициент теплоотдачи – 20 Вт/(м²·К). Температура энергоносителя внутри трубы составляла 343,15 К.

Типичные результаты численного моделирования приведены на рис. 2 и 3.

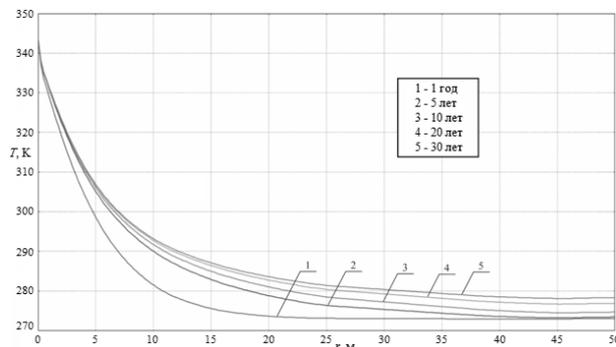


Рис. 2. Распределение температур в рассматриваемой области решения на глубине 5 м.

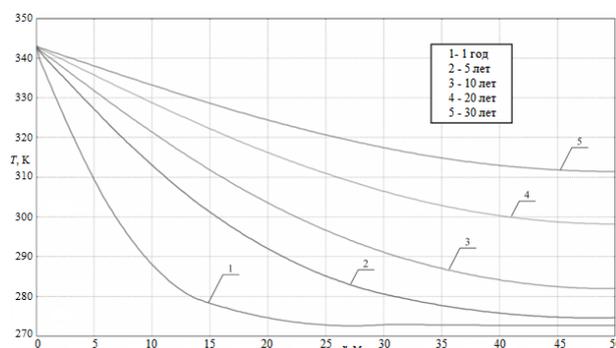


Рис. 3. Распределение температур в рассматриваемой области решения на глубине 2500 м.

Характер распределений температур (рис. 2, 3) позволяет говорить об ожидаемой их зависимости от глубины рассматриваемого сечения. Рис. 2 и 3, свидетельствуют о существенном влиянии нестационарности процессов теплопереноса на распределение температур. Анализ полей температур показывает, что со временем они выравниваются, однако за рассматриваемый промежуток времени (30 лет) стационарный режим теплопроводности еще не наступает.

Влияние теплоотвода на верхней границе оказывает влияние на тепловые режимы месторождений геотермальных источников энергии в Томской области до глубины в 50-70 метров (сопоставление рис. 2 и 3). Этот результат важен в практическом плане, поскольку позволяет выбирать варианты бурения скважин (вертикальное, горизонтальное или наклонное) и расстояния между ними.

Список литературы:

1. Официальный интернет-портал Администрации Томской области. 2023. URL: <https://tomsk.gov.ru/news/front/view/id/102710> (дата обращения: 14.04.2023).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-29-00464)

УДК 543.4, 536.462

ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ НА ОСНОВЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Савицкий А.Г.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Периодическое ужесточение требований к эффективности и уровню вредных выбросов энергетических установок и агрегатов, работающих на сжигании газообразного и жидкого топлива, осложняет их разработку. Проектирование и создание современных или модернизация уже существующих систем невозможно без однозначного представления физических процессов, протекающих в камерах сгорания. Детальное экспериментальное исследование взаимодействия потока с пламенем в трехмерных течениях, часто нестационарных, опирается на анализ локального тепло-массообмена и специфику химических реакций. Подобный анализ требует одновременных измерений скорости, температуры и концентрации молекул, процессов смешения и горения. Однако проведение экспериментов при реальных условиях является сложной технической задачей, поэтому при разработке горелочных устройств активно применяются методы численного моделирования. Результаты численного моделирования процессов, протекающих в горелочных устройствах, в особенности процессов горения, нуждаются в валидации на упрощенных физических моделях.

В настоящее время метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (англ.: planar laser-induced fluorescence PLIF), основанный на регистрации отношения интенсивности флуоресценции при возбуждении двух различных переходов гидроксильного радикала (two-line OH PLIF) активно используется для оценки температуры в продуктах горения [1, 2]. В различных работах сообщается, что наиболее популярной парой переходов является пара Q1(5):Q1(14) переходов (1-0) электронной системы A2Σ+–X2Π, так как она имеет наибольшее отношение регистрируемых сигналов, а также обеспечивает хорошее совпадение значений температуры со значениями, полученными другими методами [3–5].

Корректная интерпретация регистрируемого сигнала флуоресценции является ключевым моментом для оценки поля температуры пламени методом two-line PLIF. Цель данной работы – развитие и применение математических алгоритмов обработки сигнала лазерно-индуцированной флуоресценции для вычисления поля температуры в пламени.

При невысокой интенсивности зондирующего лазерного излучения I_{las} , сигнал флуоресценции будет линейно зависеть от I_{las} , в отличие от режимов с насыщением. Также, присутствует зависимость от концентрации флуоресцирующего вещества C_{fl} , заселенности энергетического уровня $g_{v,J}(T)$, с которого происходит возбуждение, определяемой функцией распределения Больцмана, сечения поглощения σ_{abs} , учитывающего коэффициент Эйнштейна V_{ik} и спектрального перекрытия линий поглощения и лазера, квантового выхода ϕ и константы Торт, зависящей от параметров

измерительной системы. Регистрируемый сигнал состоит из сигнала флуоресценции PLIF и интенсивности фонового сигнала IBG. Описанная зависимость выражается формулами (1-5).

$$I_{LIF} = C_{fl} T_{opt} I_{las} g_{v,J}(T) \sigma_{abs}(\lambda_{las}, P, T) \phi \quad (1)$$

$$g_{v,J}(T) = N_0(2J+1)e^{-\frac{E}{kT}} \quad (2)$$

$$\sigma_{abs} = \frac{h\nu_{las}}{c} B_{ik} \int S_{las}(v', \nu_{las}) S_{line}(v', \nu_{ik}) dv' \quad (3)$$

$$\phi = \frac{A_{ik}}{\sum_j A_{jk} + Q_k(P, T, C_q) + P_k} \quad (4)$$

$$I = I_{LIF} + I_{BG} \quad (5)$$

PLIF изображения были обработаны набором математических алгоритмов, включающих в себя коррекцию пространственной неоднородности распределения энергии в лазерном ноже и чувствительности регистрирующих матриц камер. Помимо этого, к изображениям применялись процедуры удаления фона, теневого тока и переотражений.

После применения описанных выше алгоритмов, температура пламени может быть оценена по формуле (6).

$$T = -\frac{E_1 - E_2}{k \ln \left(\frac{I_{LIF1} I_{las2} \nu_{las2} (2J_2 + 1) B_2}{I_{LIF2} I_{las1} \nu_{las1} (2J_1 + 1) B_1} \right)} \quad (6)$$

Для демонстрации алгоритмов обработки сигнала флуоресценции в работе будут представлены экспериментальные данные, полученные при возбуждении радикала OH в бедном метано-воздушном пламени. Число Рейнольдса составляло $Re = 1000$, коэффициент избытка топлива $\phi = 0,92$.

Список литературы:

1. Ayoola B. et al. Temperature response of turbulent premixed flames to inlet velocity oscillations // Experiments in Fluids. 2009. V.46. P.27-41.
2. Yang Z. et al. Effects of N2, CO2 and H2O dilutions on temperature and concentration fields of OH in methane Bunsen flames by using PLIF thermometry and bi-directional PLIF // Experimental Thermal and Fluid Science. 2017. V. 81. P. 209-222.
3. Giezendanner-Thoben R. et al. Phase-locked temperature measurements by two-line OH PLIF thermometry of a self-excited combustion instability in a gas turbine model combustor // Flow, Turbulence and Combustion. 2005. V. 75. P. 317-333.
4. Devillers R., Bruneaux G., Schulz C. Development of a two-line OH-laser-induced fluorescence thermometry diagnostics strategy for gas-phase temperature measurements in engines // Applied optics. 2008. V. 47. № 31. P. 5871-5885.
5. Lobasov A. S. et al. On the efficiency of using different excitation lines of (1–0) two-line OH fluorescence for planar thermometry // Thermophysics and Aeromechanics. 2021. V. 28. № 5. P. 751-755.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН

УДК 620.9

СЖИГАНИЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ ВИХРЕВОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Садкин И.С., Шадрин Е.Ю., Копьев Е.П., Мухина М.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Совместное сжигание жидких и твердых углеродо-содержащих отходов является одним из перспективных подходов к утилизации топлива. Данная технология обеспечивает устойчивое воспламенение угольного топлива за счет быстрого испарения диспергированного жидкого топлива и поддержания необходимой для горения угля температуры в камере сгорания. Закрутка потока позволяет увеличить время пребывания частиц топлива в камере сгорания, что повышает степень выгорания углерода при относительно небольших размерах и мощности устройства. Кроме того, данный подход может быть частью активно развивающейся концепции Waste-to-Energy в условиях массового накопления промышленных отходов [1-2]. Привлекательность такого подхода обусловлена низкой стоимостью энергоносителей, которые могут быть заменой качественным видам топлива для различных технологических процессов.

Ранее было проведено исследование [3] совместного сжигания каменного длиннопламенного угля и дизельного топлива в распылительном горелочном устройстве малой мощности (до 15 кВт). Однако проведенные исследования показали низкую эффективность используемого устройства при сжигании угля: наблюдался высокий уровень мех. недожога.

Целью данной работы является изучение процесса совместного сжигания жидкого и пылеугольного топлива (ПУТ) в модифицированном распылительном вихревом горелочном устройстве, схема которого представлена на рис. 1.

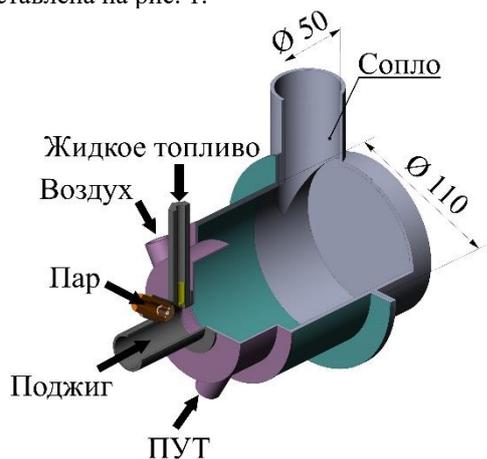


Рис. 1. Схема вихревого горелочного устройства для совместного сжигания жидкого и пылеугольного топлива.

Основными особенностями исследуемого устройства являются: подача перегретого водяного пара в область горения для распыления жидкого топлива повышения экологических характеристик сжигания; тангенциальная подача угольной пыли с первичным вихрем в области распыления жидкого топлива. Благодаря чему обеспечивается высокая полнота сгорания топлива и низкий уровень вредных выбросов в горелочном устройстве малой мощности.

С использованием экспериментального стенда [4] проведены измерения полной теплоты сгорания топлива и газовый анализ конечных продуктов сгорания. Изучена эффективность исследуемого горелочного устройства для совместного сжигания жидкого и пылеугольного топлива.

Список литературы:

1. Meng X., de Jong W., Kudra T. A state-of-the-art review of pulse combustion: Principles, modeling, applications and R&D issues // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 55. P. 73-114. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.110.
2. Lam S.S., Liew R.K., Jusoh A., Chong C.T., Ani F.N., Chase H.A. Progress in waste oil to sustainable energy, with emphasis on pyrolysis techniques // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 53. P. 741-753. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.005.
3. Шадрин Е.Ю., Садкин И.С., Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Копьев Е.П. Исследование процесса совместного сжигания жидкого и пылеугольного топлива в горелочном устройстве малой мощности // Сборник тезисов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых "XXXVIII Сибирский теплофизический семинар". 29–31 августа 2022, Новосибирск, Россия. С. 261.
4. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V., Vigrayanov M.S. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam // Energy. 2022. Vol. 250. Art. No. 123849. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123849.

УДК 621.311

**НЕНУЛЕВЫЕ ВЫБРОСЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ
НА УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ С «НУЛЕВЫМИ» ВЫБРОСАМИ****Садкин И.С.^{1,2}, Щинников П.А.¹**¹Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

На фоне возрастающей глобальной озабоченности проблемами изменения климата и снижения антропогенных выбросов активное развитие получили кислородно-топливные энергетические циклы, призванные значительно сократить уровень вредных выбросов в атмосферу при производстве электроэнергии за счет практически 100% улавливания парниковых газов, так как CO₂ и водяной пар являются единственными побочными продуктами производства электроэнергии. Среди них наиболее проработанным считается Цикл Аллама [1, 2, 3]. Автором цикла (R.J. Allam) заявляется возможность достижения рекордного для одноступенчатых циклов КПД в диапазоне 51-59%, меньшие значения для установки с внутрицикловой газификацией угля, большие – при работе на природном газе. В обоих случаях КПД учитывает затраты на вывод диоксида углерода для захоронения. Заявляется также привлекательная удельная стоимость установленной мощности: 1000-1800 \$/кВт [1, 3].

Однако отсутствуют подробные рекомендации относительно организации цикла, оптимальных значений в его ключевых точках. Отмечаются только некоторые аспекты, такие как важность подвода низкопотенциального тепла, например, от воздухоразделительной установки или газификатора угля для достижения высоких показателей эффективности, и приводятся отдельные рекомендации по термодинамическим параметрам определяющих точек. Кроме того, подробно не рассматривается вопрос обновления рабочего тела цикла и вывода углекислоты на захоронение. Однако данный параметр является ключевым при рассмотрении энергетических циклов на углекислом газе с точки зрения достижения нулевого выброса.

В данной работе на примере цикла с двухступенчатым подъемом давления насосом и компрессором (по аналогии с циклом Аллама) рассматривается влияние архитектуры цикла в части организации тепловых потоков системы регенерации. Предлагается оценить влияние промежуточной регенерации между ступенями подъема давления на эффективность цикла в широком диапазоне начальных параметров с помощью термодинамического анализа [4-6].

В качестве рабочего тела рассматривается углекислота, массовая доля которой превышает 95%. Остальное – водяные пары, обусловленные водородом топлива. Процессы рассматриваются как изоэнтروпийные [4-6].

В работе рассматриваются особенности обновления рабочего тела цикла за счет непрерывной генерации его добавки в камере сгорания путем кислородного сжигания газообразного топлива и непрерывного отвода эквивалентного количества углекислоты за пределы цикла после совершения работы расширения, что делает CO₂ единственным побочным продуктом производства электроэнергии. В случае полной утилизации углекислого газа можно говорить о достижении нулевого выброса в атмосферу. Однако величина обновления рабочего тела (вывода углекислоты на захоронение) существенно отличается в зависимости от архитектуры энергетического цикла, что представляет интерес для анализа. Особое внимание уделяется определению зависимостей количества выводимого на захоронение CO₂ от термодинамических параметров, конфигурации и эффективности энергетического цикла, а также величины собственных нужд с целью выявления наиболее оптимальной архитектуры цикла по критерию эффективности производства электроэнергии с нулевыми выбросами.

Список литературы:

1. Allam, R., Martin, S., Forrest, B., Fetvedt, J., Lu, X., Freed, D., Brown, G.W., Sasaki, T., Itoh, M., Manning, J.: Demonstration of the Allam Cycle: An Update on the Development Status of a High Efficiency Supercritical Carbon Dioxide Power Process Employing Full Carbon Capture. Energy Procedia. 2017. 114. 5948–5966 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1731>
2. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide / Allam R.J. et al. // Energy Procedia. 2013. T.37. P. 1135–1149. DOI: 10.1016/j.egypro.2013.05.211
3. <https://netpower.com/>
4. Influence of the initial parameters on the thermodynamic efficiency of carbon dioxide power cycles / P.A. Shchinnikov, I.S. Sadkin, A.P. Shchinnikov, N.F. Cheganova, N.I. Vorogushina // Journal of Physics: Conference Series. 2022. V.2150. Art. 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2150/1/012011>
5. Efficiency of zero emission cycles on the basis of their configuration / P. Shchinnikov, O. Borush, A. Frantseva, I. Sadkin // E3S Web of Conferences. 2021. V. 289, pp. 02001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128902001>
6. Алексеевко, С. В. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO₂-циклов при кислородном сжигании метана / С. В. Алексеевко, П. А. Щинников, И. С. Садкин // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 1. С. 89-98.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
в рамках реализации программы развития НГТУ,
научный проект №С23-27*

УДК 621.9

СВЧ-ПИРОЛИЗ ОТХОДА ПЕРЕРАБОТКИ КЕДРОВОГО ОРЕХА В ВЫСОКОКАЛОРИЙНЫЙ ГАЗ

Табакаев Р.Б.¹, Калинин И.²

¹ Тюменский государственный университет,
625003, г. Тюмень ул. Володарского, 6

² Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

В результате деятельности агропромышленного комплекса образуется огромное количество биоресурсов, вовлечение которых может заместить существенную долю используемых ископаемых органических топлив. В частности, к таким биоресурсам можно отнести скорлупу кедрового ореха. Как правило, сжигание такого вида сырья традиционными методами экономически нецелесообразно, поэтому прибегают к его термической переработке.

В настоящей работе рассмотрена термическая переработка скорлупы кедровых орехов посредством СВЧ-пириоза. Скорлупу выдерживали до воздушно-сухого состояния, измельчали до фракции менее 200 мкм и прессовали в гранулу массой $3,0 \pm 0,1$ г, после чего помещали в реактор лабораторного стенда. Эксперименты проводили на лабораторном стенде, по подробно описанном в [1]. На рис. 1 показана зависимость поглощения мощности СВЧ-излучения образцом скорлупы. Видно, что при СВЧ-воздействии образец имеет два пика поглощения мощности: первый пик (с момента облучения до 30 секунд) обусловлен наличием в образце влаги, второй пик (от 60 до 80 секунд) – выделением в процессе разложения паров пирогенетической воды и ароматических углеводов (смола).

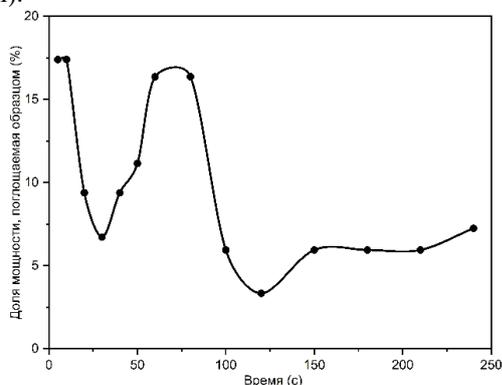


Рис. 1. Доля мощности, поглощенной образцом скорлупы при СВЧ-воздействии, в зависимости от времени облучения.

Согласно [2] при изменении агрегатного состояния вещества (в данном случае выделение жидкой и газообразных фаз) диэлектрическая проницаемость испытывает скачкообразные изменения, связанные с резким изменением термодинамических функций.

При визуальном изучении процесса посредством высокоскоростной видеосъемки (см. рис. 2) отмечено, что в процессе СВЧ-пириоза внутри образца и на его поверхности возникали электрические разряды, наличие которых приводит к протеканию энергоемких реакций. Например, анализируя данные по составу газа (см. рис. 3), полученные в процессе СВЧ-пириоза,

можно заметить, что под действием СВЧ-излучения в составе генерируемого газа содержится высокая концентрация СО и H₂. Учитывая то, что при термическом разложении топлива образуются твердый углеродистый остаток, пирогенетическая вода, смолы и газ, можно предположить, что пирогенетическая вода в присутствии разрядов вступает в реакцию с углеродом топлива: $C + H_2O = CO + H_2$.

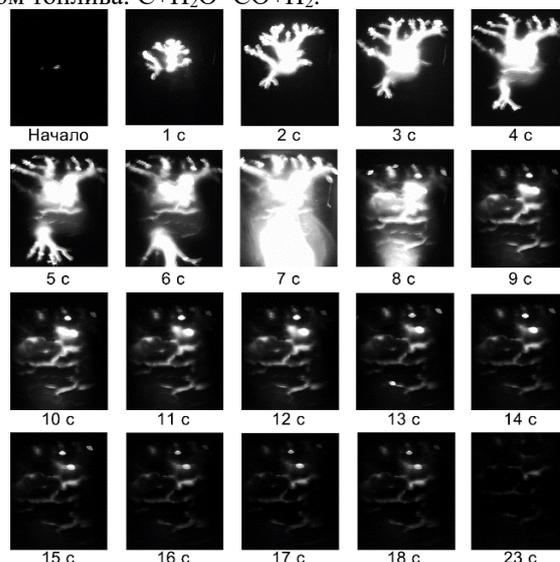


Рис. 2. Визуализация процесса СВЧ-пириоза с момента инициирования по 23 с.

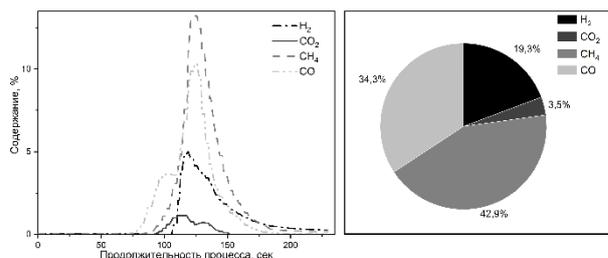


Рис. 3. Состав пиролизного газа, полученного при СВЧ-пириозе скорлупы кедрового ореха.

Таким образом, можно отметить, что СВЧ-переработка скорлупы кедровых орехов позволяет получить высококалорийный газ ($21,8 \text{ МДж/м}^3$) с высоким содержанием водорода (более 19%).

Список литературы:

1. Табакаев Р.Б., Дмитриук И.Д., Калинин И.К., Астафьев А.В., Гиль А.В., Ибраева К.Т., Чумерин П.Ю. Экспериментальное исследование СВЧ-пириоза твердых органических топлив // Известия Томского политехнического университета. 2022. Т. 333. № 12. С. 1-2.
2. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. 1963.

Работа выполнена при поддержке РФФ 22-19-00410

УДК 621.9

АГЛОМЕРИРОВАНИЕ И РАЗДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ СУСПЕНЗИЙ ПРИ СОУДАРЕНИИ КАПЕЛЬ И ЧАСТИЦ

Ткаченко П.П., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Столкновение капель суспензий является важным процессом во многих инженерных и научных приложениях, таких как топливные, химические, оросительные и пищевые технологии [1]. Этот процесс определяет ключевые технологические параметры, такие как распределение размеров капель, степень смешивания, скорость испарения и теплообмен, что существенно влияет на эффективность и надежность процессов, связанных с данным явлением [2,3]. Понимание физики столкновений капель суспензий имеет решающее значение [4] для целого ряда применений – от распылительной сушки до предотвращения загрязнения воздуха [5]. Изучение закономерностей взаимодействия капель суспензий между собой в нагретой газовой среде позволит улучшить существующие технологические процессы и разработать новые технологии для сушки аэрозолей или их зажигания в топках котлов.

В настоящей работе установлены условия коагуляции капель, а также их интенсивного вторичного измельчения для интенсификации их сушки, зажигания и горения в топках котлов. Установлено, что повышение температуры газовой среды приводит к существенному изменению размеров и свойств капель, а также к возникновению колебательных явлений в системе. Обосновано, что соударения капель суспензий в газовой среде с повышенной температурой является сложным и многопараметрическим.

Процесс соударения капель с твердыми углеродистыми частицами регистрировался высокоскоростной видеокамерой Photron mini UX100 с разрешением 1280×1000 и объективом Nikon ED AF Micro Nikkor 100 mm. Съемка велась с частотой 5000 кадр/с и межкадровой задержкой 1/20000 с. Для дополнительной подсветки использовался диодный прожектор. Область регистрации выбиралась и настраивалась таким образом, чтобы обеспечить слежение за параметрами родительских и сформировавшихся вторичных капель. Выбор диапазона изменения скорости движения основан на том, чтобы обеспечить реализацию различных режимов столкновения: коагуляция и дробление. Во время проведения эксперимента капля суспензии располагалась на специальном держателе. Для нагрева газовой среды до температуры 90–120 °С использовалась спиртовая или газовая горелка. Контроль температуры в области столкновения осуществлялся с помощью хромель-алюмелевой термопары.

Проведенные эксперименты показали, что процесс соударения капель суспензий в нагретой до 90–120 °С газовой среде довольно сложный вследствие многопараметричности. Находящиеся в газовой среде капли суспензий двигаются под воздействием внешних сил, таких как гравитация, вязкость газа, аэродинамические силы и другие. В случае, когда скорость движения капель достаточно велика, при

соударении они преодолевают силы поверхностного натяжения и коагулируют, что приводит к изменению свойств результирующей капли.

Высокоскоростная видеорегистрация показала, что увеличение времени нахождения капли суспензии в газовой среде с повышенной температурой приводит к постепенному испарению жидкости с ее поверхности. При последовательном столкновении двух капель суспензии (снарядов) с подсушенной каплей суспензии (мишенью) растекание жидкости капли-снаряда №1 существенно отличается от случая столкновения капли-снаряда с каплей-мишенью, находящейся в нагретой до 90 °С газовой среде меньшее время ($\tau=5$ с).

Изменение концентрации твердых частиц в суспензии от 10 до 60 мас% влияет на характеристики соударения через различные механизмы, включая эффекты, связанные с силами вязкости и поверхностного натяжения, адгезией и коагуляцией частиц. При пониженных скоростях движения капель (до 1–1,5 м/с) влияние концентрации твердых частиц на процесс соударения ограничивается эффектами, связанными с их взаимодействием с жидкой средой.

Проведенные эксперименты показали, что соударение капель суспензий в газовой среде, нагретой до 90–120 °С, приводит к значительному уменьшению размеров капель. Этот эффект обусловлен увеличением скорости движения молекул газа при повышении температуры, что приводит к увеличению интенсивности столкновений молекул с каплями суспензии. Кроме того, при соударении капель суспензии в газовой среде с температурой до 90–120 °С происходит образование мельчайших капель, что обусловлено микро-взрывными эффектами и интенсификации парообразования на поверхности капель.

Список литературы:

1. Wu G. и др. Simulation on a three-dimensional collision of a moving droplet against a moving super-hydrophobic particle // Powder Technol. 2022. Т. 405. С. 117558.
2. Suo S. и др. Development of a New Hybrid Stochastic/Trajectory Droplet Collision Model for Spray Simulations in Internal Combustion Engines // Int. J. Multiph. Flow. 2021. Т. 137.
3. Lain S., Sommerfeld M. Influence of droplet collision modelling in Euler/Lagrange calculations of spray evolution // Int. J. Multiph. Flow. 2020. Т. 132.
4. Rosa B., Pozorski J., Wang L.-P. Effects of turbulence modulation and gravity on particle collision statistics // Int. J. Multiph. Flow. 2020. Т. 129. С. 103334.
5. Ebadi A., Hosseinalipour S.M. The collision of immiscible droplets in three-phase liquid systems: A numerical study using phase-field lattice Boltzmann method // Chem. Eng. Res. Des. 2022. Т. 178. С. 289–314.

*Исследования выполнены за счет средств гранта
Российского научного фонда (проект 18-71-10002-П,
<https://rscf.ru/en/project/21-71-03001/>)*

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОГО ОСТАТКА ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Ушаков К.Ю., Горина В.З., Богомолов А.Р.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28

В России объём шин, которые ежегодно приходят в негодность, составляет не менее 800 000 тонн, при этом утилизируется лишь 25–28% [1]. Утилизация и переработка крупногабаритных шин в Кузбассе является одной из актуальных проблем, так как большинство угольных предприятий региона оснащено большегрузной техникой, в частности, карьерными самосвалами, основными отходами которой являются отработанные шины.

К одним из наиболее известных способов переработки отходов резинотехнических изделий относится процесс пиролиза, в результате которого образуется пиролизный газ, жидкие продукты и твердый углеродсодержащий остаток. После пиролиза в [2] предложена стадия углекислотной газификации твердых отходов резинотехнических изделий. В работе [3] предложен способ утилизации, включающий в себя последовательное проведение процессов пиролиза резины и активации углеродного остатка. В исследовании [4] представлены данные по анализу сорбционных свойств твердого остатка после пиролиза резинотехнических изделий, что свидетельствует о возможности его использования в качестве сорбента после дополнительной газификации.

Целью работы является исследование твердого остатка, полученного после пиролиза и последующей активации в углекислотной среде крупногабаритных шин. В качестве сырья для термообработки в работе использовалась измельченная фракция кл. 2–4 мм отходов крупногабаритных шин карьерных самосвалов, предоставленная компанией АО ХК «СДС-Уголь».

После пиролиза (при температуре 600°C продолжительностью 70 минут) проводился процесс углекислотной газификации при температуре 940°C, 960°C, 980°C, соответственно.

На ИКФП – спектрах твердых остатков имеются следующие полосы поглощения: валентные O–H – колебания, класс соединений – фенолы, спирты (полосы поглощения в диапазоне 3429, 3428, 3445 см⁻¹); CH₂–CH₃ – группы, класс соединений – алканы, нафтены (2914, 2871–3049, 2870–3041 см⁻¹); валентные C=C группы, класс соединений – ароматические (1597, 1578, 1597 см⁻¹); SiO=O и S=O (силикаты, сульфаты) или C–O–C (простые эфиры) (1099, 1097, 1096 см⁻¹). В работе проведена оценка изменения относительного содержания соединений в твердом остатке на каждом этапе обработки.

Также в работе произведен анализ изображений поверхности твердых остатков. Сравнение образцов по содержанию серы (2,58 – 3,43 мас.%) со значениями элементного содержания серы в исходной резине (1,3 мас.%) показало, что значительная доля органической серы после газификации остается в составе твердого углеродного остатка.

Определена общая влага согласно [5] и зольность по [6]. Процентное содержание влаги всех образцов не превышает 10%, что говорит о пригодности использования твердого остатка в качестве сорбента [7, 8], в свою очередь зольность образцов не превышает 15%.

Для определения пригодности твердого остатка для использования в качестве сорбента было проведено определение адсорбционной активности по метиленовому голубому. Показано, что на показатели адсорбционной активности влияют текстурные характеристики образцов (удельная поверхность, общий объём пор, распределение пор по размерам). Так, уменьшение адсорбционной активности при температуре 960°C прослеживается с увеличением среднего диаметра мезопор. При повышении температуры углекислотной активации с 940°C до 980°C удельная поверхность углеродного остатка снижается. Отмечено, что параметры процессов пиролиза и газификации оказывают влияние на развитие пористости углеродной структуры твердого остатка.

В результате показано, что твердый углеродсодержащий остаток после пиролиза и газификации может быть использован в качестве сорбента для очистки сточных вод промышленных предприятий. Определено, что отсутствует прямая зависимость между величиной удельной поверхности и значениями адсорбционной активности образцов, поэтому при определении пригодности твердого углеродсодержащего остатка необходимо учитывать диаметр пор, наличие функциональных групп, определяемых на ИКФП-спектрах.

Список литературы:

1. Экошинсоюз: Обзор деятельности... Москва. 2022.
2. Продукты переработки отходов резинотехнических изделий / Богомолов А.Р. и др. // Сб. XII конф. «Россия молодая». 2020. С.95102.1-95102.7
3. Патент 2780839 С1 РФ, МПК В29В 17/00, F23G 7/12, C08J 11/00 Способ комплексной переработки резинотехнических отходов. № 2021133167.
4. Углеродсодержащие сорбенты из отработанных шин для очистки карьерных вод / Рыбак Л.В. и др. // Уголь. 2018. №7 (1108). С. 62-67.
5. ГОСТ 52911 – 2013. Топливо твердое минеральное. Москва: Стандартинформ. 2014. 14 с.
6. ГОСТ 55661 – 2013. Топливо твердое минеральное. № 1232: Москва: Стандартинформ. 2014. 14с.
7. ТУ 20-5827985-01-91 Сорбент графитированный СГН-30, СГН-30А. 1991. 4с.
8. ГОСТ 4453-74 Уголь активный осветляющий древесный поршкообразный. Москва: 1976. 23с.

Работа выполнена при финансовой поддержке в соответствии с дополнительным соглашением № 075-03-2021-138/3 о предоставлении субсидии из федерального бюджета вып. гос. задания на оказание государственных услуг (внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3)

УДК 546.81 542.943-92

ОСОБЕННОСТИ ОКИСЛЕНИЯ СВИНЦА ВОДОКИСЛОРОДНЫМ ФЛЮИДОМ**Федяева О.Н., Гребенников А.П., Востриков А.А.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследование окисления свинца представляет как фундаментальный, так и прикладной интерес из-за его широкого использования в электронной и электрической технике [1,2], в качестве жидкометаллического теплоносителя в атомной энергетике [3,4]. Одной из проблем использования свинца в качестве теплоносителя является его химическая активность по отношению к воде и кислороду при рабочих значениях температуры и давления. При попадании кислорода и воды в контур теплоносителя образуются примеси в виде оксидов, что приводит к резкому ухудшению теплоотвода из активной зоны и, как следствие, к резкому сокращению ресурса работы установки.

Из анализа литературы следует, что кинетика и механизмы окисления свинца кислородом изучены в деталях. В то же время, данные по окислению свинца водой и водокислородным флюидом при повышенных температурах и давлениях нами не обнаружены. При изучении начальных стадий окисления свинца установлено [5], что чистые кристаллиты устойчивы к окислению при 370 К, однако формирование центров нуклеации поверхностными примесями ускоряет анизотропный рост пленок орторомбического PbO. Исходя из этого авторы [5] предположили, что лимитирующей стадией окисления является диссоциация O₂. Согласно [6], окисление свинца кислородом включает три стадии: диссоциацию и хемосорбцию молекулы O₂ на поверхности свинца; диффузию атомарного кислорода в решетке и нуклеацию оксида; кристаллизацию и рост стехиометрической оксидной фазы.

В докладе обсуждаются результаты исследования окисления массивных образцов свинца водой, кислородом, водокислородным флюидом и водным раствором перекиси водорода при равномерном нагреве (1 К/мин) реактора до 873 К. Плотность кислорода и воды в реакционной смеси варьировалась в пределах 0,29-0,57 и 1,17-4,61 моль/дм³ соответственно. В ходе эксперимента регистрировались временные зависимости температуры стенки реактора, температуры реакционной смеси, измеренной с помощью Pt-Rh/Pt термопары, введенной в центр реакционного объема, и давления реакционной смеси. После эксперимента измерялись прирост массы образцов и остаточное давление кислорода в реакторе. С помощью уравнения состояния Редлиха-Квонга по методике [7] определены температурные зависимости количества O₂ в реакционной смеси, температуры начала заметного окисления и кинетика начальных стадий процесса. Показано, что окисление свинца начинается до его плавления (T_{пл} = 600,6 К), а формирующийся оксидный слой препятствует растеканию жидкого свинца, т.е. ухудшает его текучие свойства. Наименьшая скорость процесса наблюдалась при окислении свинца чистыми H₂O и

O₂, а наибольшая – при окислении водокислородным флюидом. Увеличение содержания O₂ в водокислородном флюиде способствовало ускорению окисления.

Из анализа изображений, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), следует, что размер и морфология синтезированных оксидов зависят от соотношения O₂ и H₂O в реакционной смеси. Толщина окисленного слоя в пределах одного образца свинца варьировалась от сотен нанометров до нескольких миллиметров (рис. 1).

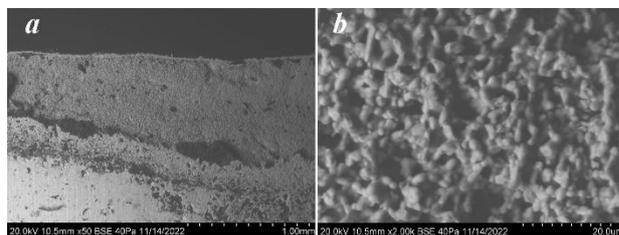


Рис. 1. СЭМ изображения поперечного среза образца свинца, окисленного водокислородным флюидом ($\rho_{H_2O} = 1,17$ моль/дм³ и $\rho_{O_2} = 0,57$ моль/дм³).

Согласно данным рентгенофазового анализа, в составе продуктов, полученных при окислении свинца водокислородным флюидом, преобладает тетрагональный Pb₃O₄, также в небольших количествах содержатся тетрагональный и орторомбический PbO.

Основываясь на полученных результатах, предложены механизмы процесса и высказано предположение о синергетическом эффекте воды и кислорода на окисление свинца.

Список литературы:

1. May G.J., Davidson A., Monahov B. Lead batteries for utility energy storage: A review // J. Energy Storage. 2018. V. 15. P. 145.
2. Cui J., Forsberg E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: A review // J. Hazard. Mater. 2003. V. 99. P. 243.
3. Зродников А.В., Ефанов А.Д., Орлов Ю.И., Мартынов П.Н., Троянов В.М., Русанов А.Е. Технология тяжелых жидкометаллических теплоносителей свинец-висмут и свинец // Атомная энергия. 2004. Т. 97, №2. С. 98.
4. Takahashi M., Uchida S., Kasahara Y. Design study on reactor structure of Pb-Bi-cooled direct contact boiling water fast reactor (PBWFR) // Prog. Nuclear Energy. 2008. V. 50. P. 197.
5. Thürmer K., Williams E., Reutt-Robey J. Autocatalytic oxidation of lead crystallite surface // Science. 2002. V. 297. P. 2033.
6. Sun B., Zhang P., Wang Z., Duan S., Zhao X.-G., Ma X., Xue Q.-K. Atomic oxygen adsorption and incipient oxidation of the Pb(111) surface: A density-functional theory study // Phys. Rev. B 2008. V. 78. P. 035421.
7. Vostrikov A.A., Fedyaeva O.N. Mechanism and kinetics of Al₂O₃ nanoparticles formation by reaction of bulk Al with H₂O and CO₂ at sub- and supercritical conditions // J. Supercrit. Fluids. 2010. V. 55. P. 307.

УДК 62-665.9

ГАЗИФИКАЦИЯ ОТХОДОВ БИОМАССЫ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЕ

Федяева О.Н.¹, Морозов С.В.^{1,2}, Востриков А.А.¹¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 9

Переработка отходов биомассы вызывает большой интерес из-за возможности одновременного восстановления ресурсов и снижения нагрузки на окружающую среду. Непрерывное увеличение объема таких отходов, в частности, различных видов навоза позволяет рассматривать их как в качестве возобновляемого топлива, так и сырья для производства синтез-газа. Поскольку отходы биомассы обводнены (содержание воды в них составляет от 50 до 90%), а традиционные методы термической переработки требуют их предварительного высушивания, сопровождающегося эмиссией токсичных веществ в атмосферу [1], то конверсия этих отходов в сверхкритической воде (СКВ: $T > 374^\circ\text{C}$, $P > 22.1$ МПа), осуществляемая с использованием замкнутых реакционных систем, рассматривается в качестве одного из перспективных методов их переработки.

Анализ литературных данных показывает, что основное внимание исследователей сфокусировано на СКВ газификации отходов биомассы, направленной на получение синтез-газа. Увеличению выхода синтез-газа способствуют повышение температуры, времени реакции, отношения вода / биомасса и использование катализаторов [2,3]. В то же время, составу водорастворимых продуктов, содержащих целый спектр токсичных веществ, таких как фенолы, азотсодержащие ароматические соединения и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [4,5], внимания почти не уделяется. Особую актуальность это принимает при СКВ газификации куриного помета, содержание азота в котором находится на уровне 3-6% [6].

В докладе обсуждаются результаты исследования СКВ газификации куриного помета (КП), непрерывно подаваемого в трубчатый реактор при градиенте температуры вдоль его вертикальной оси (сверху вниз: $390\text{--}600^\circ\text{C}$) и давлении 25 МПа. Эксперименты проведены при варьировании времени пребывания реагентов в высокотемпературной части реактора (ВТР), без и при добавлении NaOH к суспензии. Получены данные по выходу и составу летучих, жидких и твердых продуктов, а также содержанию токсичных соединений (фенолов, азотсодержащих ароматических соединений и ПАУ) и минеральных компонентов в воде, собранной на выходе из реактора. С помощью газовой хроматографии / масс-спектрометрии установлено, что в составе водорастворимых продуктов преобладают фенол, пиридин, пирразин, пиррол, анилин, индол, хинолин и их алкил-производные. Показано, что увеличение времени пребывания реагентов в ВТР повышает эффективность газификации КП и содержание ПАУ в воде (от 0,5 до 2,1 мг/л), но снижает содержание в ней фенолов (1,3 до 1,1 г/л). Добавление NaOH приводит к снижению содержания азотсодержащих ароматических соединений в воде (от 1,0 до 0,7

г/л) и увеличению содержания в ней ионов NH_4^+ (от 9,8 до 10,9 г/л).

Из сравнения полученных результатов с величинами максимально допустимых концентраций (МДК) химических веществ в сточных водах [7] следует, что содержание некоторых идентифицированных соединений в воде на порядки превышает МДК. Принимая во внимание механизмы образования и трансформации токсичных соединений в гидротермальных условиях, кинетику и механизмы их окисления в СКВ/О₂ флюиде, большие энергетические затраты на производство синтез-газа посредством СКВ газификации биомассы и необходимость поддержания температуры $\approx 750^\circ\text{C}$ для полного превращения ароматических соединений [5,8,9], а также то, что предел текучести основных видов сталей, используемых в качестве конструкционных материалов, ограничен температурой 650°C , сделан вывод о том, что сверхкритическое водное окисление отходов биомассы может оказаться более экологически чистым и ресурсосберегающим по сравнению с процессом газификации.

Список литературы:

- Li J., Li L., Suvarna M., Pan L., Tabatabaei M., Ok Y.S., Wang X. Wet wastes to bioenergy and biochar: A critical review with future perspectives// *Sci. Total Environ.* 2022. V. 817. P. 152921.
- Hu Y., Gong M., Xing X., Wang H., Zeng Y., Xu C.C. Supercritical water gasification of biomass model compounds: A review// *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020. V. 118. P. 109529.
- Gutierrez Ortiz F.J. Biofuel production from supercritical water gasification of sustainable biomass// *Energy Conv. Manag.* X. 2022. V. 14. P. 100164.
- Babaei K., Bozorg A., Tavasoli A. Hydrogen-rich gas production through supercritical water gasification of chicken manure over activated carbon/ceria-based nickel catalysts// *J. Analyt. Appl. Pyrolysis.* 2021. V. 159. P. 105318.
- Liu S., Cao W., Wang Y., Wei W., Li L., Jin L., Guo L. Characteristics and mechanisms of nitrogen transformation during chicken manure gasification in supercritical water// *Waste Manag.* 2022. V. 153. P. 240-248.
- Федяева О.Н., Востриков А.А. Переработка обводненных токсичных отходов свиноводства и птицеводства в сверхкритической воде (Обзор)// *СКФ-ТП.* 2022. Т. 17, №2. С. 3-23.
- Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 N 644 (ред. от 30.11.2021), <https://docs.cntd.ru/document/499036854>.
- Wahyudiono, Matsunaga Y., Machmudah S., Sasaki M., Goto M. Supercritical water as a reaction medium for nitrogen-containing heterocycles// *J. Chem. Chem. Eng.* 2012. V. 6. P. 897-910.
- Bogdan V.I., Koklin A.E., Bogdan T.V., Mishanin I.I., Kalenchuk A.N., Laptinskaya T.V., Kustov L.M. Hydrogen generation by gasification of phenol and alcohols in supercritical water// *Int. J. Hydrogen Energy.* 2020. V. 45. P. 30178-30187.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-19-20003
при финансовой поддержке
Правительства Новосибирской области № р-10*

УДК 621.18.049

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ УГЛЯ В ТОПКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА НА УСКП

Фоменко Н.Е., Прохоров В.Б., Фоменко М.В.

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ",
111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14

Основным направлением повышения эффективности сжигания твердого топлива является рост начальных параметров пара. В настоящее время за рубежом уже широко используются энергоблоки на сверхсверхкритические параметры пара и выполняются исследования по разработке энергоблоков на ультрасверхкритические параметры пара.

В связи с этим, является актуальным обновление парка электростанций РФ, работающих на твердом топливе, за счет разработок и строительства новых энергоблоков с одновременным повышением параметров пара выше сверхкритических на основе накопленного мирового опыта.

Использование технологии паротурбинных угольных энергоблоков параметрами свежего пара 700–760°C и более 35 МПа (ультрасверхкритические параметры – УСКП) позволяет достичь самого высокого КПД по выработке электроэнергии среди всех существующих классов паротурбинных тепловых электрических станций на твердом топливе. Одними из существующих концепций котлов на УСКП являются U- и M-образные котлы, имеющие инвертную топку.

Авторами доклада разработана схема сжигания Кузнецкого тощего угля в инвертной топке с применением различных методов численного моделирования [1]. В настоящей работе выполнено численное моделирование в программном комплексе вычислительной гидрогазодинамики ANSYS Fluent горения расчетного угля в топке с разработанной схемой расположения прямоточных горелок и сопел (см. рис. 1).

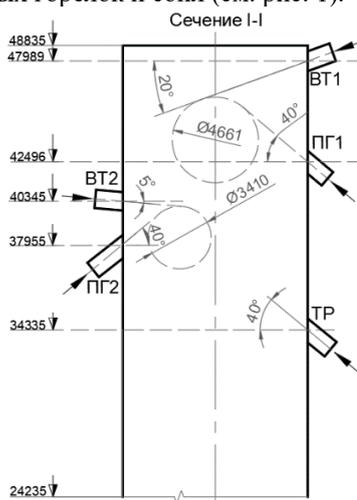


Рис. 1. Разработанная схема сжигания топлива для инвертной топки (ПГ1 и ПГ2 – горелки первого и второго яруса, ВТ1 и ВТ2 – сопла вторичного воздуха первого и второго яруса, ТР – сопла третичного воздуха).

В схеме реализовано ступенчатое сжигание топлива с двухъярусным расположением горелок и сопел вторичного воздуха. Третичный воздух подается в нижней части топки и наклоном сопла вверх под 40°.

Численная модель топки валидирована [2] и позволяет решать следующие задачи: движение и турбулентные процессы, теплообмен, химическую кинетику гетерогенных и гомогенных реакций, образование оксидов азота NO_x . Исходные данные для граничных условий модели получены на основе теплового расчета топки, системы пылеприготовления.

Результаты моделирования разработанной схемы расположения горелок и сопел в инвертной топке выявили высокие показатели ее экологичности и эффективности: механический недожог топлива менее 1% (меньше нормативного значения 5%), температура на выходе из топки 1242°C (меньше температуры начала деформации золы 1340°C). Уровень оксидов азота 442 мг/м³ требует использования вторичных мер подавления NO_x . Схема дает довольно растянутый факел по высоте топки с выделением двух высокотемпературных зон в области горелок верхнего и нижнего яруса. Отсутствует прямое касание горелочными струями стен топки, что должно уменьшить вероятность шлакования топочных экранов. Отмечается интенсивное вихреобразование в горизонтальных и вертикальных плоскостях.

Для оценки работоспособности схемы на пониженных нагрузках проведены вариативные расчеты – моделирование работы схемы на нагрузках котла 70% и 50%. Для нагрузок 70% и 50% получены следующие показатели: механический недожог ~0,6% и ~0,1%; температура дымовых газов на выходе из топки 1181°C и 1057°C; концентрация оксидов азота NO_x на выходе из топки 317 мг/м³ и 217 мг/м³ соответственно. Данные результаты подтверждают эффективность схемы и надежность работы схемы на пониженных нагрузках.

Список литературы:

1. В. Б. Прохоров, Н. Е. Фоменко, М. В. Фоменко Использование упрощенной численной модели для первичной оценки топочной аэродинамики на примере инвертной топки котла на ультрасверхкритические параметры пара // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 9. С. 422-431.
2. Prokhorov V. B., Fomenko M. V., Fomenko N. E. Solid fuel combustion processes modelling in the furnace in terms of the boiler K-50-14-250 // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. Т. 1683. №. 4. С. 042050.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-19-00722, <https://rscf.ru/project/22-19-00722/>

УДК 534.22.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ДВУХТОПЛИВНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОДОРОДОМ

Фомин П.А., Троцюк А.В., Тетервова И.В.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

Выполнено физико-математическое моделирование детонационного сгорания двухтопливных газовых смесей CO-H₂-воздух и CH₄-H₂-воздух. Интерес к исследованию детонации рассматриваемых смесей связан, во-первых, с перспективами их технического использования. Например, в двигателях на вращающейся детонации (метано-водородная смесь) и установках по детонационной утилизации органических отходов ультраперегретым паром (синтез-газ). Во-вторых, разбавление CO и CH₄ водородом играет роль инструмента для управления и контроля детонационных процессов, приводя к уменьшению размера детонационной ячейки, перестройке детонационной структуры и уменьшению энергии прямого инициирования детонационной волны.

Проведенное исследование состоит из двух взаимосвязанных частей: разработка обобщенных моделей кинетики химических превращений и их верификация на численных расчетах ячеистых детонационных структур.

Предлагаемые кинетические модели являются эффективной альтернативой детальным кинетическим схемам, позволяя рассчитывать молярную массу и внутреннюю энергию смеси без расчета ее детального химического состава. Модели оригинальны, просты, физически обоснованы, обладают высокой точностью, согласованы со вторым началом термодинамики и соответствуют принципу Ле Шателье, описывают как течение реакции во времени, так и состояние химического равновесия, применимы во всем диапазоне концентраций реагирующих компонент внутри детонационных пределов.

Модели кинетики двустадийные (период индукции и зона основного тепловыделения). Предложены формулы для расчета периода индукции бинарных смесей на основе соответствующих известных зависимостей для каждого топлива в отдельности.

На основе расчета детального химического состава смесей при детонационных давлениях и температурах полагалось, что в индукционной зоне химический состав синтез-газа не меняется. В то же время реальные многостадийные процессы в метано-водородной смеси заменялись брутто-реакцией, удовлетворяющей следующим условиям. (i) Суммарное тепловыделение к моменту окончания периода индукции много меньше максимально возможного теплового эффекта, соответствующего полной рекомбинации продуктов реакции. (ii) Метан за время периода индукции разлагается с образованием CO и OH. Таким образом, с учетом (i) полагается, что в зоне индукции все молекулы метана рано или поздно участвуют в реакции CH₄+O₂→CO+OH+1,5H₂. Изложенные предположения о характере химических превращений в зоне индукции позволили получить алгебраические формулы

для вычисления молярной массы и внутренней энергии смеси в любой момент времени внутри зоны индукции.

В зоне основного тепловыделения молярная масса смеси μ рассчитывается по одному обыкновенному дифференциальному кинетическому уравнению:

$$\frac{d\mu}{dt} = 4K_+ \frac{\rho^2}{\mu} \left(1 - \frac{\mu}{\mu_{\max}}\right)^2 - AT^{3/4} (1 - e^{-\theta/T})^{3/2} \rho \left(\frac{\mu}{\mu_{\min}} - 1\right) e^{-E/RT}.$$

Константы K_+ , A , E , μ_{\min} , μ_{\max} , θ имеют четкий физический смысл и определяются начальным составом смеси до начала расчетов; R – универсальная газовая постоянная, ρ – плотность, T – температура, t – время. Подгоночных параметров в предлагаемой модели нет. Для расчета показателя адиабаты и внутренней энергии смеси предложены явные алгебраические формулы относительно давления и температуры.

Предложенные модели кинетики имплементированы в численный код расчета параметров и структуры детонационной волны [1]. Динамика газовой смеси описывалась двумерными нестационарными уравнениями Эйлера. Производился расчет распространения волны в плоском канале различной ширины. Полагалось, что поперечный размер ячейки a_0 соответствует такой ширине канала, при которой после выхода волны на стационарный режим структура волны включает две основные максимально симметричные поперечные волны, движущиеся в противофазе относительно поперечной координаты.

В расчетах получены основные качественные особенности детонационных структур, обнаруженные в эксперименте. Результаты расчета a_0 при различных соотношениях между горючими хорошо соответствуют эксперименту (например, для стехиометрической смеси 0,4CH₄ + 0,6H₂ с воздухом расчет и эксперимент [2] дают значения 74 и 68 мм соответственно). Это подтверждает высокую точность предлагаемых кинетических моделей и эффективность используемого численного кода.

Список литературы:

1. Fomin P.A., Trotsyuk A.V., Vasil'ev A.A. Approximate model of chemical reaction kinetics for detonation processes in mixture of CH₄ with Air // Combustion Science and Technology. 2014. V. 186. № 10-11. P. 1716-1735.
2. Bozier O., Sorin R., Virof F., Desbordes D. Detonability of binary H₂/CH₄-Air mixtures. // 3rd International Colloquium on Hydrogen Safety, Ajaccio, France, 2009, Paper id 188.

Вычисления проведены с использованием комплекса MVS-10Q в МСЦ РАН, Москва

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского Научного Фонда № 22-29-01307,
<http://rscf.ru/project/22-29-0137/>*

УДК 621.57

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РЕКУПЕРАТОРА ПАРОКОМПРЕССИОННОЙ УСТАНОВКИ НА РАЗЛИЧНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛАХ

Хисматуллин Р.М., Ермаков А.М., Салахов Р.Р.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Россия, Казань, ул. К. Маркса, 10

Активное внедрение электромобилей и электробусов приводит к необходимости обогревать салон транспортного средства зимой и охлаждать в летом. Обогрев за счет прямого электронагрева сильно сокращает пробег электромобиля, поэтому их производители переходят на парокомпрессионные установки, которые позволяют закрыть потребности, как охлаждения салона, так и его обогрева, за счет перевода парокомпрессионной установки в режим «теплого насоса».

Для снижения потребления электроэнергии на нужды климатической установки необходимо повышать её термодинамическую эффективность. Основным направлением является применение переохладителей жидкого хладагента после конденсатора [1], что может поднять термодинамический КПД цикла до 20%, но такой вариант предполагает использования жидкого охладителя и сложно реализуем в электро-транспорте. Вторым направлением является использованием регенеративного цикла [2], где представлено исследование в программном комплексе Aspen и повышение коэффициента преобразования составляет 22-25%, что является завышенным результатом, т.к. не учитывается геометрия теплообменника-регенератора. Экспериментальные данные показывают рост коэффициента преобразования около 10% [3]. Следовательно, для более качественного прогнозирования и получения достоверных результатов в процессе расчетов необходимо учитывать конструкцию теплообменника, а также свойства хладагентов, изменяющиеся в зависимости от температуры и давления.

В данной работе проведено исследование влияния геометрических размеров теплообменника регенератора на эффективность парокомпрессионной холодильной машины. В качестве объекта исследования взята климатическая парокомпрессионная установка электробуса. Оборудование установки подобрано для обеспечения холодильной мощности 30 кВт. Создана одномерная математическая модель, с учетом геометрических размеров теплообменного оборудования, которая была верифицирована по экспериментальным данным, погрешность моделирования составляла не более 1,87%.

Конструкция регенератора представляет собой теплообменный аппарат типа труба в трубе скрученный в спираль, для экономии места. Для обеспечения низкого уровня гидравлических потерь газообразный хладагент двигается по внутренней трубке с большим проходным сечением, а жидкий хладагент между трубками, с малым проходным сечением. Проведено исследование влияния изменения: внутреннего диаметра, высоты ребер, длины теплообменного аппарата, при работе установки в режиме обогрева, т.к.

данный режим является самым энергозатратным при эксплуатации климатической установки. Температура в испарителе составляла $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в конденсаторе $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Диаметр внутренней выбраны исходя из медных труб, применяемых в кондиционировании 13, 16, 20, 26 и 33 мм. Длина трубки – 2000 мм. Влияние диаметра внутренней трубки при использовании фреонов R290, R410a и R507a, наиболее подходящих для режима обогрева, показано на Рис. 1.

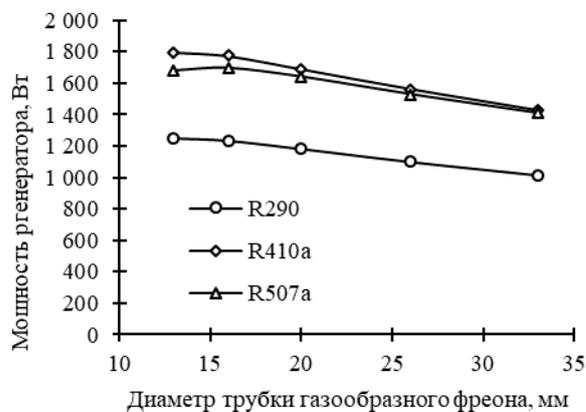


Рис. 1. Влияние диаметра внутренней трубки теплообменника регенератора на его тепловую мощность

С увеличением внутреннего диаметра тепловая мощность теплообменника падает, что связано с уменьшением скорости газообразного хладагента. Коэффициент преобразования парокомпрессионной установки регенеративного цикла по сравнению с циклом без регенератора снижался при фреоне R290 с 10% до 8,64%, при R410a с 10,39% до 9,38%, при R507a с 13,54% до 11,58%. Применение регенератора позволяет поднять коэффициент преобразования на 10-13%, в зависимости от рабочего тела.

Список литературы:

1. Колосов М.А. Парокомпрессионные холодильные машины с переохладителем жидкого хладагента после конденсатора перед дросселированием // Холодильная техника. 2016. № 8. С. 20-23.
2. Sihombing H, Nasution A., Ambarita, H. Effect of internal heat exchanger to the performance of vapor compression cycle using refrigerant R32 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. №648. 012029.
3. Djuanda. Performance study of double pipe internal heat exchanger in R-410a air conditioning system // AIP Conference Proceedings. 2018. №1984, 020008.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00373, <https://rscf.ru/project/22-19-00373/>

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ С «НУЛЕВЫМИ» ВЫБРОСАМИ**Щинников П.А.**Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20

Современная климатическая повестка, являясь одной из цивилизационных задач развития, связана с необходимостью снижения роста температуры и требует сокращения антропогенного выброса углекислоты в атмосферу. Учитывая, что одним из основных «поставщиков» углекислоты в атмосферу является энергетика на органическом топливе, доля которой велика и, даже в условиях сокращения продолжает оставаться доминирующей в мировом энергобалансе, задачи ее развития рассматриваются через призму сокращения выбросов этого продукта.

Сегодня существует понимание того, что проблему декарбонизации переходом к зеленой генерации энергии в полном объеме не решить, поэтому мировая энергетика не ограничивается такими решениями. Разработки, направленные на снижение выбросов загрязняющих атмосферу газов при сжигании органического топлива разного состава в традиционных циклах, наиболее полно отражаются в сборнике наилучших доступных технологий (BAT Referens), подготовленном Объединенным исследовательским центром (Joint Research Centre, Spain) [1]. Здесь уделяется внимание таким направлениям развития техники, как кислородное сжигание, улавливание загрязняющих атмосферу газов, в том числе CO₂, его захоронение, однако тот же документ отмечает, что важнейшим фактором является технико-экономическое сочетание экологического воздействия, технической готовности, энергоэффективности и управления всеми процессами. В том же ключе рассматриваются и переход от угольной генерации к использованию экологически чистого газа или смесовых видов топлив, в том числе на основе биомассы, или к технологиям внутрицикловой газификации угля [2], что характерно для американской или японской энергетических программ.

Принципиально рассматривают несколько вариантов развития энергетика на органическом топливе – переход на водородную энергетику, улавливание углекислоты из продуктов сгорания и сжигание органического топлива в кислороде с переходом на новое рабочее тело в виде CO₂. Каждое из направлений обладает экологическими достоинствами. Наиболее «продвинутым» можно считать направление, связанное со сжиганием природного газа в кислороде, когда продукты сгорания являются рабочим телом. В этом случае не требуется выделение CO₂ из продуктов сгорания, а наиболее предпочтительным вариантом захоронения считают его транспорт по трубопроводным системам и закачку в подземные горизонты. Теория применения CO₂ циклов или циклов с нулевыми выбросами в мировой энергетике пока не выработана. Обоб-

щающие исследования затруднены отсутствием практической реализации подобных циклов в энергетических установках. Основные направления исследований в мире связаны с тремя видами циклов на основе углекислоты - цикл Аллама [3], цикл ОИВТ [4] и цикл Граца [5]. Все они могут обеспечить полное отсутствие выброса CO₂ в атмосферу.

Такое техническое решение успешно реализовано в виде CO₂-цикла в США в г. Ла-Порте [6]. Практическая реализация CO₂-цикла усилила интерес к подобным установкам. В Питсбурге, в США проводится конференция по суперкритическим CO₂-циклам. Известны работы по подобным технологиям разных научных коллективов, в том числе и в России. Вместе с тем актуальность исследований подобных новых технологий в энергетике высокая.

В докладе предлагается исследование CO₂-циклов разной архитектуры [7] с выделением их термодинамических, энергетических и экономических особенностей. Термодинамический анализ циклов проведен в сравнении с широко используемыми в энергетике циклами Ренкина и Брайтона. Оценки энергетической эффективности и показатели стоимости проведены в параметрической постановке задач анализа. Приводится поагрегатная оценка капиталовложений в основное оборудование.

Список литературы:

1. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) / Thierry Lecomte and other // EUR 28836 EN. 2017. 940 p. doi:10.2760/949, ISBN 978-92-79-74303-0
2. Ольховский, Г. Г. Новые проекты ПГУ с газификацией угля (обзор) / Г. Г. Ольховский // Теплоэнергетика. 2016. № 10. С. 3-13. – DOI 10.1134/S0040363616100076. – EDN WLNHZL.
3. Allam, R., Martin, S., Forrest, B., Fetvedt, J., Lu, X., Freed, D., Brown, G.W., Sasaki, T., Itoh, M., Manning, J.: Demonstration of the Allam Cycle: An Update on the Development Status of a High Efficiency Supercritical Carbon Dioxide Power Process Employing Full Carbon Capture. Energy Procedia. 2017. 114. 5948–5966. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1731>
4. Концептуальная схема парогазовой установки с полным улавливанием диоксида углерода из продуктов сгорания / А. С. Косой, Ю. А. Зейгарник, О. С. Попель [и др.] // Теплоэнергетика. 2018. № 9. С. 23-32. DOI 10.1134/S0040363618090047
5. <http://www.graz-cycle.tugraz.at/>
6. <https://netpower.com/>
7. Алексеев С.В. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO₂-циклов при кислородном сжигании метана / С.В. Алексеев, П.А. Щинников, И.С. Садкин // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 1. С. 89-98.

*Исследование выполнено при поддержке гранта
Российского научного фонда №23-29-00035,
<https://rscf.ru/project/23-29-00035>*

СЕКЦИЯ 8

Теплофизика микро- и наносистем

УДК 539.196.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЛЮОРОФОРОВ НА СВОРАЧИВАНИЕ БЕЛКОВ В FRET-ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Андрющенко В.А., Чекмарев С.Ф.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

На сегодняшний день метод резонансной передачи энергии Фёрстера (FRET) является одним из наиболее перспективных подходов для изучения динамики различных систем на микро- и наномасштабах [1]. Особую актуальность он приобретает при изучении динамики сворачивания белков, т.к. является наиболее эффективным методом отслеживания отдельных траекторий сворачивания белка. Ключевой вопрос в применении метода FRET заключается в том, какое влияние могут оказывать флюорофоры на процесс сворачивания. Также, при всех своих достоинствах, метод FRET требует поддержки в виде моделирования на молекулярном уровне для адекватной интерпретации результатов измерений.

В данной работе проводится молекулярно-динамическое моделирование FRET-эксперимента по сворачиванию BBL домена, белка, состоящего из 45 аминокислотных остатков [2, 3]. Изучаемая FRET структура представляет собой систему, состоящую из самого белка и двух флюорофоров Су3- и Су-5, закрепленных на концах белка, как это происходит в реальных FRET-экспериментах. Схематичная иллюстрация изучаемой структуры представлена на рисунке (см. рис. 1). Белок и флюорофоры моделируются на атомарном уровне разрешения. FRET структура и 25 000 молекул воды (TIP3P), моделирующих растворитель, помещаются в куб с ребром 95 Å и периодическими граничными условиями. Моделирование проводится с помощью пакета CHARMM [4].

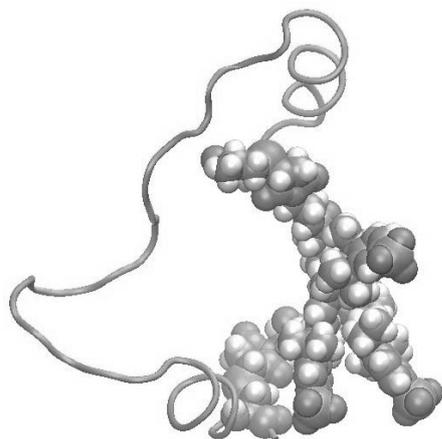


Рис. 1. Характерная иллюстрация сближения флюорофоров. Белок изображен в ленточном представлении, флюорофоры в представлении сфер Ван-дер-Ваальса.

Установлено, что при $T = 280$ К, $T = 300$ К и $T = 350$ К нативное состояние белка и FRET структуры стабильны. Для каждой температуры моделируется пятнадцать траекторий сворачивания как самого белка, так и соответствующей ему FRET структуры. Установлено, что присутствие флюорофоров в целом не изменяет общей картины сворачивания, за исключением того, что FRET структура сворачивается значительно медленнее, чем исходный белок. Это обстоятельство также означает, что кинетика сворачивания FRET структуры в значительной степени остается одноэкспоненциальной с двумя характерными состояниями, наблюдаемыми для исходного белка. Гистограммы FRET-эффективности, построенные на основе смоделированных траекторий сворачивания, находятся в согласии с экспериментальными гистограммами. Изучение влияния флюорофоров на структуру молекул растворителя вблизи белка и распределение заряда показывает, что в некоторых случаях перераспределение заряда вблизи флюорофоров может приводить к их сближению, что существенно затрудняет сворачивание белка (см. рис. 1).

Список литературы:

1. Jares-Erijman E. A., Jovin T. M. FRET imaging //Nature biotechnology. 2003. Т. 21. №. 11. С. 1387-1395.
2. Huang F., Ying L., Fersht A. R. Direct observation of barrier-limited folding of BBL by single-molecule fluorescence resonance energy transfer //Proceedings of the National Academy of Sciences. 2009. Т. 106. №. 38. С. 16239-16244.
3. Liu J. et al. Exploring one-state downhill protein folding in single molecules //Proceedings of the National Academy of Sciences. 2012. Т. 109. №. 1. С. 179-184.
4. Brooks B. R. et al. CHARMM: the biomolecular simulation program // Journal of computational chemistry. 2009. Т. 30. №. 10. С. 1545-1614.

УДК 539.196.3

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Андрющенко В.А.^{1,2}, Артишевский К.В.¹, Смовж Д.В.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящее время процессы, происходящие на микро- и нано- масштабах в приповерхностных областях, привлекают существенное внимание. В значительной степени это обстоятельство связано с совершенствованием микро- [1, 2] и нано- устройств [3, 4], а также расширением области их применения. В связи с увеличением роли приповерхностных явлений с уменьшением размера объекта, одной из основных практических задач, возникающих при создании подобных устройств, является управление их смачиваемостью. Традиционно создание приборов с заданной смачиваемостью поверхности осуществляется путем выбора соответствующего материала, нанесение на его поверхность различных текстур или пленок. Для совершенствования процесса создания материалов с заданными поверхностными свойствами, особенно на микро- и нано- масштабах, необходимо понимание молекулярных механизмов, ответственных за смачивание различных систем.

В данной работе исследуется смачиваемость различных текстурированных поверхностей на молекулярном уровне. При этом производится изучение растекания капли на этих поверхностях (см. рис. 1). Характер смачивания оценивается по стационарным значениям краевых углов. Изучение производится методом молекулярной динамики с использованием программного пакета LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) [5]. Поверхности рассматриваются на атомарном уровне. Водное окружение рассматривается явно. В качестве модели воды используется одна из наиболее надежных моделей – модель TIP4P. Система моделируется в приближении канонического ансамбля. Рассматриваются различные по лиофильности материалы. При моделировании изменяются линейные размеры системы, глубина, форма и регулярность, создаваемых поверхностных текстур. При исследовании смачивания вычисляются как геометрические характеристики водной капли, так и распределение молекул воды в приповерхностной зоне (профили плотности, ориентация и т.д.).

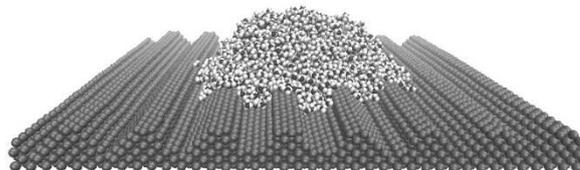


Рис. 1. Характерная иллюстрация растекания водной капли по гидрофильной текстурированной поверхности.

В результате проведения молекулярно-динамического моделирования установлено, что нанесение текстуры на конкретную поверхность может приводить как к увеличению, так и уменьшению значения стационарного краевого угла в зависимости от геометрических характеристик наносимых структур. Кроме того, установлено, что динамика растекания капли также определяется геометрией наносимых текстур. Так, например, на гидрофильных материалах капля преимущественно растекается вдоль нанесенных на поверхность канавок. Данные обстоятельства иллюстрируют возможность управления смачиваемостью поверхности, путем создания на ней текстур с определенными геометрическими характеристиками.

Список литературы:

1. Polla D. L. et al. Microdevices in medicine //Annual review of biomedical engineering. 2000. Т. 2. №. 1. С. 551-576.
2. Lindström S., Andersson-Svahn H. Overview of single-cell analyses: microdevices and applications //Lab on a Chip. 2010. Т. 10. №. 24. С. 3363-3372.
3. Shafiq M. et al. An overview of the applications of nanomaterials and nanodevices in the food industry //Foods. 2020. Т. 9. №. 2. С. 148.
4. Maiti U. N. et al. 25th anniversary article: chemically modified/doped carbon nanotubes & graphene for optimized nanostructures & nanodevices //Advanced Materials. 2014. Т. 26. №. 1. С. 40-67.
5. Thompson A. P. et al. LAMMPS-a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales //Computer Physics Communications. 2022. Т. 271. С. 108171.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект № 23-29-00260)*

УДК 621.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КИПЕНИЯ

Быковская Е.Ф., Зайцев Д.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Кипение в микроканалах позволяет создавать высокоэффективные малогабаритные системы охлаждения, которые могут применяться в электронике и микроэлектронике, в электромобилях, авионике, силовых подсистемах промышленных лазеров, оборудовании для беспроводных телекоммуникационных сетей и радаров, в том числе оборонного назначения.

Известно, что морфология поверхности существенно влияет на смачиваемость [1, 2] и на интенсивность теплообмена при кипении. Целью данной работы является анализ смачиваемости рабочих поверхностей, которые используются в исследованиях динамики двухфазного потока при кипении в микроканалах. В нашу задачу входит исследование смачиваемости медных подложек, имеющих различную морфологию поверхности: 1) гладкая, 2) шероховатая, 3) пористая, 4) с графеновым покрытием, и 5) с покрытием из одностенных карбоновых нанотрубок – и выбор среди них микроструктуры поверхности, обеспечивающей оптимальный теплоотвод.

Известно, что смачиваемость определяется взаимодействием молекул газа, жидкости и твердого тела, и количественно характеризуется двумя величинами: наступающим краевым углом смачивания и оттекающим краевым углом смачивания.

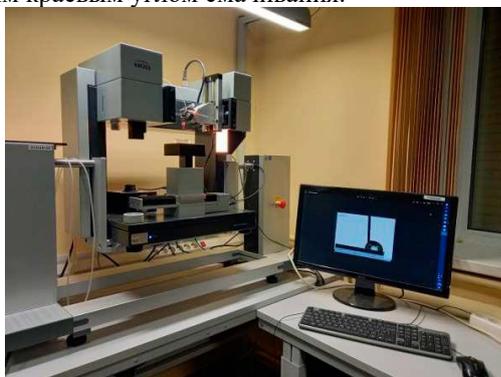
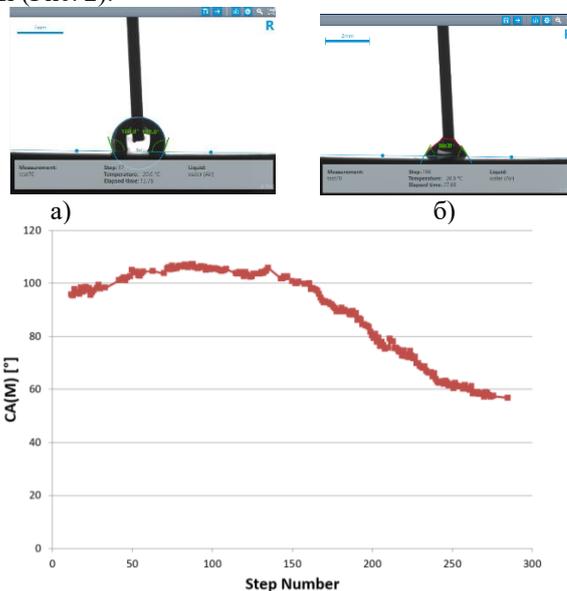


Рис. 1. Установка KRUSS DSA 100 для измерения краевых углов смачивания.

Свойства смачиваемости всех поверхностей определяются с помощью прибора для измерения краевого угла смачивания KRUSS DSA-100 (Рис. 1). Программное обеспечение для измерения краевого угла смачивания Drop Shape Analyzer позволяет измерять краевой угол методом лежащей капли. Диапазон измерения: 1-180°, разрешение: $\pm 0,1^\circ$. Для определения очертания капли используется пять основных методов для описания кривизны формы капли: по уравнениям Юнга-Лапласа, эллипса, круга, а также по определению касательной, высоты и ширины. При этом в методе определения касательной используется полиномиальное приближение. Для поверхностей, имеющих микро-, наношероховатость, определяется кажущийся краевой угол смачивания. Для всех поверхностей,

определяется наступающий и отступающий краевые углы (Рис. 2).



с).

Рис. 2 а, б) Измерение наступающего и отступающего угла смачивания на медной поверхности с графеновым покрытием. с). Зависимость краевого угла смачивания от номера измерений на медной поверхности с графеновым покрытием. До измерения № 135 жидкость в каплю накачивается, начиная с измерения № 135 жидкость из капли откачивается.

В случае измерения краевого угла методом лежащей капли, капля жидкости дозируется специальным шприцем, игла которого находится в непосредственной близости от рабочей поверхности. Для измерения наступающего краевого угла, капля накачивается жидкостью через иглу с постоянным расходом. Для измерения отступающего краевого угла, жидкость откачивается из капли с постоянным расходом. Далее вычисляется, гистерезис краевого угла смачивания – как разница между этими углами. Использовалась деионизированная, нано-фильтрованная вода Milli-Q. Эксперименты проводились при комнатной температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Список литературы:

1. Марчук И.В., Чеверда В.В., Стрижак П.А., Кабов О.А. Определение поверхностного натяжения и контактного угла смачивания по форме поверхности осесимметричных пузырей и капель. // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т.22. № 3. С.311- 317.
2. Кабов О.А., Зайцев Д.В., Влияние гистерезиса смачивания на растекание капли под действием гравитации. // Доклады академии наук. 2013. Т.451. №1. с.37–40. DOI: 10.7868/S0869565213190122

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда,
(проект № 22-49-08018)

УДК 621.384.63, 539.1

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ФИЛЬТРА СИНХРОТРОНА «СКИФ» С ТОЛЩИНОЙ АЛМАЗНОГО СТЕКЛА 0.2-1.0 ММ

Винокуров В.А., Винокуров В.В., Кабов О.А., Пуховой М.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Синхротрон является универсальным инструментом для решения задач в прикладной и фундаментальной науке, в нём частицы движутся по кольцу в вакууме почти со скоростью света, а мощные электромагниты придают им энергию и задают траекторию движения. Отличительной особенностью синхротрона является то, что в процессе ускорения частиц орбита пучка остаётся постоянного радиуса, а ведущее магнитное поле возвратных магнитов, определяющее этот радиус, возрастает во времени. В Новосибирске идет строительство «Сибирского кольцевого источника фотонов» – синхротрона «СКИФ» поколения «4+» с энергией 3 ГэВ. Первым теплонагруженным элементом будет являться коллиматор, формирующий геометрические размеры пучка СИ на последующие элементы канала и рассеивающий мощность 20.28 кВт.

Одним из важных этапов работы являются численные расчеты и экспериментальные исследования тепловых фильтров, имеющих в своем составе пластины CVD-алмаза (алмаз, полученный методом химического осаждения из газовой фазы, который обладает превосходными термическими и механическими свойствами). Выбор оптимальной толщины алмазного стекла – важная задача, которую можно выполнить с помощью численных расчетов.

Один из вариантов теплового фильтра 1-й ступени синхротрона «Скиф» состоит из алмазного стекла диаметром 40 мм, которое располагается между медными фланцами диаметром 60 мм. Между алмазным стеклом и фланцами находится прослойка 0.5 мм жидкого металла. Водяное охлаждение происходит с помощью системы микроскопических каналов размером 0.5 мм x 1 мм. Размер пучка синхротронного излучения: 30 мм x 3 мм, и он направлен в центр алмазной пластины. Общее поглощение тепла в алмазной пластине составляет 1290 Вт (тепловой поток 1.35 кВт/см² – 1.5 кВт/см²). Распределение теплового потока задается из экспериментальных замеров.

Численные 3D-расчёты тепловых нагрузок и системы охлаждения выполнялись с помощью пакета программ Ansys Fluent. Толщина алмазного стекла в расчетах менялась от 0.2 мм до 1 мм. Получены распределения температуры в алмазном стекле по высоте для различных толщин алмазных пластин (Рис. 1), а также зависимость максимальной температуры в алмазе от толщины алмазного стекла (Рис. 2). Проверка точности численных расчетов проводилась с помощью контроля баланса потока тепла через нагретую и холодную границы области, а также контроля массового дисбаланса в системе.

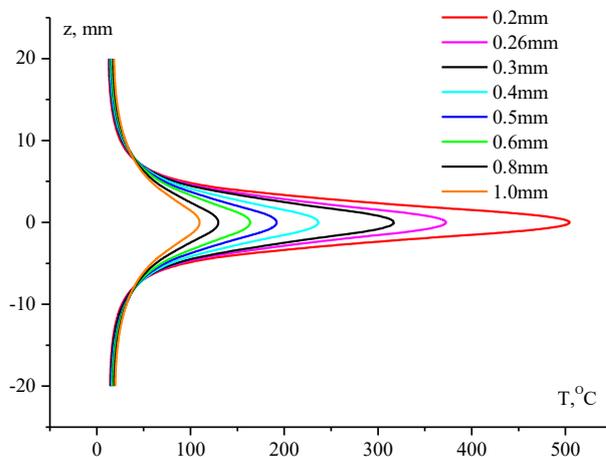


Рис. 1. Распределение температуры в алмазном стекле по высоте в сечении $x=0, y=0, -20\text{мм} \leq z \leq 20\text{мм}$. Толщина алмазного стекла: от 0.2 мм до 1 мм.

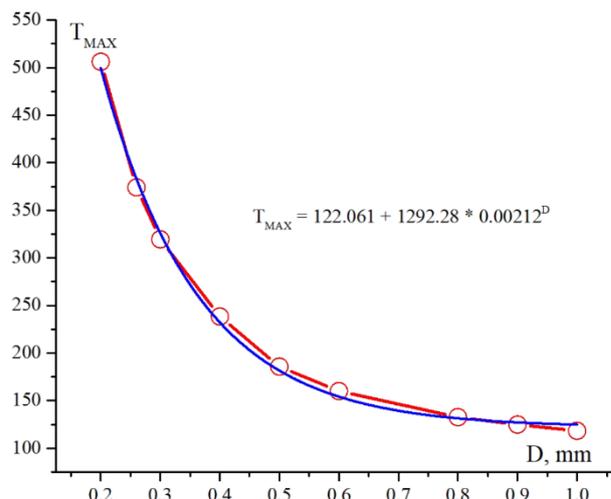


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры в алмазе от толщины алмазного стекла.

Список литературы:

- Schildkampan W., Nikitina L. Manufacturing of diamond windows for synchrotron radiation // REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS. 2012. V. 83, 095104. DOI: 10.1063/1.4748265
- Heinrich Blumer, Sasa Zelenika, Jakob Ulrich, Robin Betemps, Lothar Schulz, Franz Pfeiffer. CVD Diamond Vacuum Window for Synchrotron Radiation Beamlines // ReserachGate. 2003.
- A. Gambitta et al., "Beryllium windows for the X-ray diffraction beamline at Elettra", Sincrotrone Trieste. Internal Publication No. ST/S-TN-93/59, 1993.
- V A Vinokurov, V V Vinokurov and O A Kabov. Numerical simulation of thermal diamond filter for working. Journal of Physics: Conference Series. 2021. V.2119. P.012130 DOI:10.1088/1742-6596/2119/1/012130.

Исследование выполнено в рамках гос. задания ИТ СО РАН 121031800213-0

УДК 536.2

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ «ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ» НА КАПИЛЛЯРНОЕ ВСАСЫВАНИЕ

Володин О.А.¹, Сердюков В.С.¹, Вячеславова Е.А.²

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Академический Университет им Ж.И. Алферова,
194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Хлопина 8, к.3

Кипение жидкостей на капиллярно-пористых поверхностях является одним из эффективных методов отвода тепла от нагреваемой стенки [1]. В работе экспериментально продемонстрировано влияние гидрофильной структуры микро-наномодифицированного кремния (так называемого «черного кремния»; название связано с уникальными свойствами материала по поглощению света) с различными характеристиками «нанолеса» на капиллярное всасывание жидкости, применительно к задаче интенсификации теплообмена и повышения критического теплового потока (КТП).

На первоначальном этапе исследования, по методике, предложенной в [2], был создан стенд для измерения капиллярного всасывания модифицированных поверхностей из кремния, рис. 1. Полученные на стенде результаты по уменьшению объема жидкости в капилляре при ее впитывании в модифицированную структуру поверхности кремния позволяют получить количественные характеристики капиллярного всасывания (число Wi [2]) с достаточной для дальнейшего анализа экспериментальных результатов точностью.

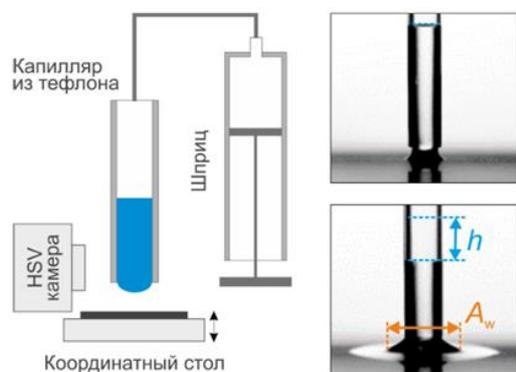


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда для измерения капиллярного всасывания поверхности и кадры высокоскоростной видеосъемки процесса.

Модификация теплообменных поверхностей из кремния осуществляется с помощью метода криогенного сухого плазмохимического травления в газовой среде SF_6/O_2 [3]. Плазмохимическое травление производится на уникальной установке “Oxford Plasmalab System 100 (ICP 380)”, имеющейся в распоряжении участников проекта из Академического Университета им. Ж.И. Алферова. На рис. 2 показан пример капиллярно-пористой структуры поверхности образца «черного кремния», полученного с помощью установки “Oxford Plasmalab System 100”.

Для исследования влияния структуры «черного кремния на капиллярное всасывание были созданы образцы модифицированного кремния, различающихся

высотой (5-10 мкм), диаметром (200-300 нм) и формой наноигл. Для создания данных образцов были подобраны оптимальные параметры модификации кремния методом сухого плазмохимического травления, такие как толщина кремниевой подложки, температура процесса, время травления и т.д.

Проведен детальный анализу физико-химических свойств изготовленных модифицированных тонкостенных кремниевых пластин (образцы №1-5), включая морфологию, свойства смачиваемости и измерение капиллярного всасывания.

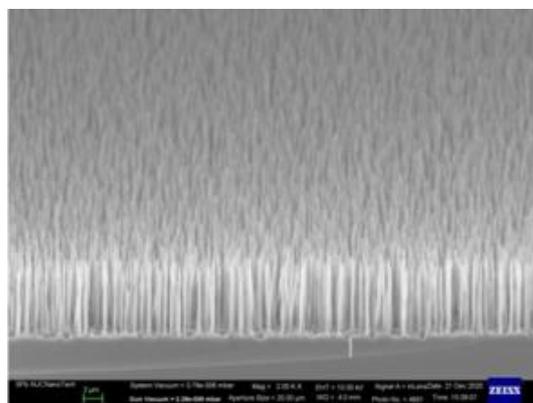


Рис. 2. СЭМ-изображение поверхности образца «черного кремния».

Первые тестовые эксперименты на воде показали существенное различие созданных образцов «черного кремния» №1-5 по смачиваемости и капиллярному всасыванию. На основе полученных данных по капиллярным свойствам образцов на следующем этапе работ будет проведено экспериментальное исследование интенсивности теплообмена и критических тепловых нагрузок при кипении воды в условиях большого объема на базовой и модифицированных кремниевых поверхностях.

Список литературы:

1. Володин О. А., Печеркин Н. И., Павленко А. Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. №. 2. С. 280-312.
2. Rahman M. M., Olceroglu E., McCarthy M. Role of wickability on the critical heat flux of structured superhydrophilic surfaces // Langmuir. 2014. Т. 30. №. 37. С. 11225-11234.
3. Vyacheslavova E. A. et al. Study of Cryogenic Unmasked Etching of “Black Silicon” with Ar Gas Additives // ACS omega. 2022. Т. 7. №. 7. С. 6053-6057.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-10092)

УДК 621.9

ДВУМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ – ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**Дмитриев А.С.¹, Клименко А.В.²**¹ Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, 111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1² Национальный исследовательский технологический университет “Московский институт стали и сплавов” (МИСиС), 119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4

В последние годы интерес к двумерным материалам (2D-материалам) значительно возрос в связи с новыми возможностями и их необычными физико-химическими свойствами, включая оптические, магнитные и тепловые. В данной работе рассмотрены перспективы применения новых двумерных наноматериалов, включая графен, гексагональный нитрид бора, 2D гетероструктуры, двумерные оксиды и халкогениды и максены как актуальные материалы в энергетических технологиях ближайшего будущего, в частности, для водородной энергетики, литий-ионных и других батарей, в суперконденсаторах, системах хранения тепловой энергии и т. д. [1-3]. Особый интерес представляют проблемы интенсификации процессов теплообмена в энергетическом оборудовании с использованием двумерных материалов. Представлены основные типы 2D-материалов, описаны их физико-технологические свойства и уникальные характеристики. Представлены отдельные технологические приемы изготовления двумерных материалов и создаваемых пленок, композитов, наножидкостей для различных энергетических приложений. Отдельное внимание уделено материалам на основе однослойного и многослойного графена, характеристикам материалов на базе графеновых компонентов, их физико-химическим и другим параметрам. Описаны эффекты, которые наблюдаются при использовании наножидкостей в качестве теплоносителей и при нанесении покрытий на основе 2D-материалов на теплопередающие поверхности при различных процессах теплообмена: однофазной конвекции, испарении, кипении, конденсации. Показано, что во всех случаях существенно повышается эффективность теплопереноса. Приведены конкретные примеры применения 2D-материалов в тепловых трубах и термосифонах, описаны способы улучшения характеристик этих устройств. Рассмотрены некоторые математические и физические модели функционирования двумерных материалов в энергетике. В частности, подробно рассмотрены новые механизмы нетривиальной капиллярной термогидродинамики при испарении из нанопористых материалов, включая ламинированный (упорядоченный) графеновый пористый материал или графеновые и комбинированные графеновые пены. Показано, что для отдельных размеров длинных узких пор между листами графена может наблюдаться испарение с поверхности с массовым потоком, превышающим предел Герца-Кнудсена для испарения в вакуум. Подобная задача в настоящее время важна для новых принципов функционирования устройств солнечной теплоэнергетики.

Особое внимание уделено особенностям механизмов теплопереноса, испарения, кипения и конденсации в процессах, связанных с двумерными материалами. В частности, описаны особенности смачивания и растекания капель по поверхности двумерных материалов, температурные зависимости контактных углов и углов гистерезиса, влияние морфологии поверхности (например, геометрической структуры поверхности) на указанные явления. Описано влияние внутренней структуры нанопористых двумерных материалов и их гибридных композитов на процессы испарения, кипения и конденсации. Показано, что внутренняя структура (ламинарная или случайная) нанопористых двумерных материалов может значительно влиять на теплофизику испарения, кипения и конденсации. Представлены экспериментальные и расчетные результаты по испарению и кипению капель жидкостей и наножидкостей из двумерных материалов на морфологически различных подложках.

Важное значение двумерных материалов в последние годы имеют процессы их взаимодействия с излучением, например солнечного планковского спектра, что важно для новых задач тепловой солнечной энергетики.

В работе указано, что имеются определенные трудности при выборе двумерных материалов для использования их в энергетике. В частности, модели теплофизических процессов с участием двумерных материалов развиты совершенно недостаточно, многие явления еще не до конца поняты и описаны.

Сделан вывод, что благодаря дополнительным исследованиям и активному применению 2D-материалов открываются беспрецедентные возможности для развития перспективных энергетических, строительных, электронных и других технологий, а также создания материалов следующего поколения с уникальными механическими, оптическими, электромагнитными и тепловыми свойствами

Список литературы:

1. Macha M., Marion S., Nandigana V., Radenovic A. 2D materials as an emerging platform for nanopore based power generation // *Nat. Rev. Mater.* 2019. V. 4. P. 588–605.
2. Дмитриев А.С., Клименко А.В. Перспективы использования двумерных материалов в энергетических технологиях (обзор). *Теплоэнергетика*, 2023, № 8, с. 1–24.
3. Dmitriev A.S. Hybrid graphene nanocomposites: thermal interface materials and functional energy materials in: graphene production and application / *Graphene Production and Application* // Ed. by S. Ameen, M.S. Akhtar, H.-S. Shin. IntechOpen, 2019.

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕЛЕТА МИКРОКАПЕЛЬ НАД ЛИНИЕЙ КОНТАКТА В ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ, НАГРЕВАЕМОЙ СНИЗУ

Кириченко Е.О., Кириченко Д.П., Зайцев Д.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В таких приложениях как спрейное охлаждение границы раздела жидкость-газ контактируют с твердыми нагретыми поверхностями. Контактная линия - область контакта трех фаз: твердой, жидкой и газообразной. Она является ключевым объектом во всех процессах, сопровождаемых испарением, динамикой капли и ее взаимодействием с твердой поверхностью.

В настоящее время принято считать, что максимальные скорости испарения достигаются в микрорегионе вблизи контактной линии. В работе [1] исследовались левитирующие микрокапли воды над границей раздела между сухим пятном и слоем жидкости на нагреваемой горизонтальной подложке. С помощью данных о траекториях капель вычисляется локальная скорость течения вблизи линии контакта.

В данной работе проводятся экспериментальные исследования по перелету левитирующих микрокапель жидкости через контактную линию со смоченной поверхности в область сухого пятна, с изменением таких параметров как температура поверхности и краевой угол смачивания.

Рабочий участок представляет собой текстолитовое основание, с нагревателем диаметром 3 мм в центре. На поверхности нагревателя создается тонкий слой жидкости и вручную формируется сухое пятно. Процесс перелета микрокапель фиксируется с помощью высокоскоростной камеры Fastcam SA 1.1 Photron с разрешением 1024x1024 пикселей и скоростью съемки до 5400 к/с. Были проведены эксперименты в диапазоне температур 52°C – 77°C, а также с изменением краевого угла смачивания.

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1, фото процесса перелета показано на рисунке 2.

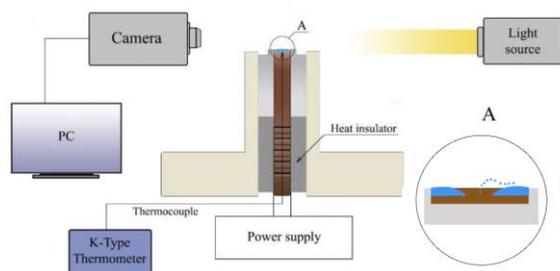


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

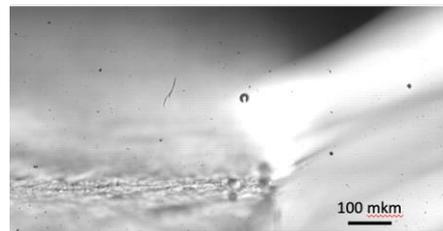


Рис. 2. Фото процесса перелета микрокапли при температуре поверхности $T = 52^\circ\text{C}$.

Было получено, что при увеличении температуры подложки увеличивается диаметр микрокапель и высота перелета. Также высота перелета увеличивается при увеличении краевого угла смачивания.

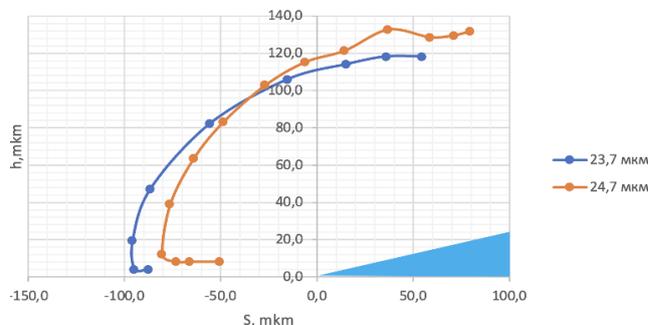


Рис. 3. Перелет микрокапель через контактную линию. $T=60^\circ$, $CA = 15^\circ$.

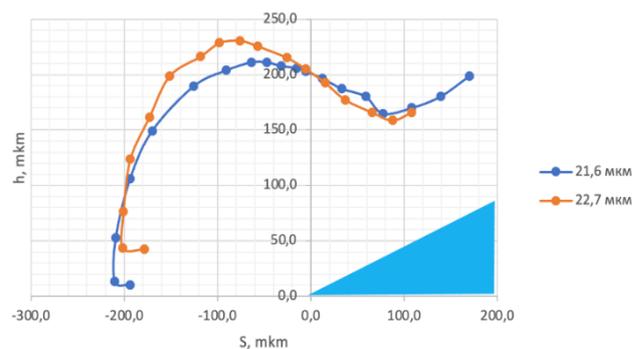


Рис. 4. Перелет микрокапель через контактную линию. $T=60^\circ\text{C}$, $CA = 30^\circ$.

Список литературы:

1. Kabov O.A., Zaitsev D.V., Kirichenko D.P. and Ajaev V.S. Investigation of moist air flow near contact line using micro-droplets as tracers // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 4 (2-3): 207–216, 2016.

Исследование выполнено за счет гранта РФФ (проект № 19-19-00695)

УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ В Т-МИКРОКАНАЛЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОТНОШЕНИЯ РАСХОДОВ**Кравцова А.Ю., Кашкарова М.В.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Для смешения жидкостей в некоторых химических и биологических технологических процессах применяются микроканальные системы различной конфигурации. Наиболее распространены т- и у-микромиксеры, форма которых напоминает соответствующие буквы. В настоящей работе исследовалось течение в т-микромиксере, входные каналы которого расположены под углом 180° друг к другу.

Существует множество работ по изучению структуры течения в т-микроканалах [1], а также по разработке способов повышения эффективности смешивания в нем [2-3].

Течение в микроканале характеризуется числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{D_h U_0}{\nu},$$

где D_h – гидравлический диаметр канала, U_0 – среднерасходная скорость, а ν – кинематическая вязкость жидкости. При $Re < 225$ течение в микроканале стационарное, при больших скоростях в потоке возникают периодические изменения. При равных расходах структура такого течения описана в [1].

В настоящей работе исследована структура течения при различных соотношениях расходов во входных каналах микромиксера.

Моделирование потока проводилось с использованием программного пакета STAR CCM+. Динамики потока жидкости в канале микронного размера моделировалась при помощи нестационарной системы уравнений Навье-Стокса. Плотность и вязкость считались постоянными. Двухфазная среда рассматривалась как взаимопроникающий континуум с общим полем давления.

На стенках канала предполагалось выполнение условий прилипания; на входах в канал задавался по-

стоянный массовый расход, таким образом, чтобы отношение расходов в первом и втором входном каналах имело конкретное значение:

$$Q_1 = \frac{RQ}{1+R}, \quad Q_2 = \frac{Q}{1+R}, \quad Q = \frac{\rho Re \nu S}{D_h}.$$

где Q_1 и Q_2 – массовые расходы в 1 и 2 входном канале.

На выходе ставилось условие свободного истечения. Давление на выходе всегда было равно 1 бар.

Численное моделирование потоков в микроканале проводилось в пространственной и нестационарной постановке. Геометрия расчётной области: два входных квадратных канала с сечением 120 x 120 мкм и один выходной прямоугольный участок сечения 120 x 240 мкм. В работе исследована структура потока в т-микроканале при больших числах Рейнольдса ($Re = 225..400$) при неравных расходах во входных каналах. Полученные результаты сопоставлялись с данными экспериментальных исследований, полученных при тех же параметрах потока. Выявлена периодичность развития вихревых структур в потоке. Определены характерные частоты развития неустойчивостей в потоке. Показано, что частота уменьшается при увеличении соотношения массовых расходов поступающих жидкостей.

Список литературы:

1. Mariotti, A., Galletti, C., Mauri, R., Salvetti, M.V., and Brunazz, E., Steady and Unsteady Regimes in a T-Shaped Micro-Mixer: Synergic Experimental and Numerical Investigation, Chem. Eng. J., 2018, vol. 341, pp. 414–431.
2. Hessel V., Leowe H., Scheonfeld F. Micromixers—A Review on Passive and Active Mixing Principles // Chem. Eng. Sci. 2005. Vol. 60. P. 2479–2501.
3. Lee C.Y., Chang C.L., Wang Y.N., Fu L.M. Microfluidic Mixing: A Review, Int. J. Mol. Sci., 2011. Vol. 12, P. 3263–3287.

*Исследование выполнено
за счет средств госбюджета*

УДК 536

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПУЛЬСАЦИЙ ЖИДКОСТИ НА УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В МИНИКАНАЛЕ**Литвинцева А.А., Чеверда В.В.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В работе приведено сравнение двух методов для улучшения интенсификации теплообмена при кипении в прямоугольном миниканале. Были проведены исследования влияния аддитивных структур на теплообмен в миниканале при двухфазном течении [1], а также исследования влияния пульсаций расхода жидкости на интенсификацию процессов теплообмена при кипении на гладких поверхностях [2].

В ходе экспериментального исследования влияние пульсаций расхода жидкости на увеличение тепломассообмена при кипении потока в прямоугольном миниканале было получено, что для частот от 0,2 до 1 Гц усиление теплообмена может достигать 25-30 % по сравнению с режимом без пульсаций [2]. Показано, что при частотах пульсаций потока жидкости менее 0,14 Гц усиление либо отсутствует, либо уменьшается по сравнению с режимом без пульсаций. Эксперименты проводились при одинаковых средних расходах жидкости в системе. С помощью визуализации поверхности локального нагревателя в миниканале с помощью ИК-камеры показано развитие кризиса в пульсирующем режиме течения. Периодическое смывание и образование сухих пятен соответствуют частотам изменения приведенных скоростей жидкости. Пульсирующий режим течения позволяет затянуть наступление кризиса в системе. Такое явление приводило к периодическому повышению температуры поверхности, не переходящему в полноценный кризис. Пульсации потока за счет кратковременного увеличения приведенной скорости жидкости позволяют смывать крупные сухие пятна. Для пульсирующего режима течения сохраняется классический переход системы к кризису кипения – по мере увеличения теплового потока площадь сухого пятна растет до тех пор, пока вся поверхность не высохнет и система не перейдет в кризис с резким повышением температуры поверхности. [2] Было показано, что использование пульсационного режима течения увеличивает теплообмен на 20-30 % в широких миниканалах с локальным источником тепла без существенного усложнения и технического усовершенствования системы охлаждения, только за счет пульсационной добавки.

Во время проведения экспериментов по исследованию влияния аддитивных структур на кризис теплообмена в прямоугольном миниканале [1] проводилось сравнение для двух нагревателей – для гладкого и с микроструктурами. На гладком нагревателе наблюдается образование маленьких пузырей, а затем при дальнейшем росте теплового потока слияние с образованием одного большого и как следствие кризис теплообмена. На нагревателе с микроструктурами при малых тепловых потоках пузырьки сливаются и эвакуируются к боковым стенкам за счет капиллярных сил. Получено, что эффективность отвода тепла выше при использовании нагревателя с микроструктурами (благодаря наличию большого количества центров испарения ввиду особенностей изготовления поверхности нагрева). Средний коэффициент теплоотдачи в предкризисном режиме $\alpha = 0,26$ Вт/(см²·К) для гладкого нагревателя, $\alpha = 0,42$ Вт/(см²·К) для нагревателя с микроструктурами ($v_{sl} = 0,06$ м/с). Кроме того, эксперименты показали, что эффективность теплоотвода выше в случае однофазного потока для аддитивного нагревателя. При использовании пульсирующего потока средний коэффициент теплоотдачи составил $\alpha = 2$ Вт/(см²·К).

Исследования показали, что использование поверхностей с микроструктурами вместе с пульсациями расхода жидкости должно приводить к улучшению теплообмена в системе.

Список литературы:

1. Eloyan K.S., Ronshin F.V., Litvintseva A.A., Cheverda V.V., Influence of superficial gas velocity on heat transfer in a two-phase system with additive heater surfaces //Journal of Physics: Conference Series – IOP Publishing, 1675 (2020) 012043
2. Litvintseva A.A., Eloyan K.S., Demytyev Y.A., Vladimirov V.Y., Influence of High-Frequency Pulsations of Liquid on Heat and Mass Transfer in Wide Minichannel during Liquid Flow Boiling //Journal of Engineering Thermophysics, 2022, Vol. 31, No. 4, pp. 655–663.

РНФ 22-29-01655 «Использование микроструктурированных поверхностей для интенсификации теплообмена при движении жидкости в миниканале».

*Ссылка на информацию о проекте:
<https://www.rscf.ru/project/22-29-01655/>*

УДК 532.5, 536.42

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДОВ ВОДЫ И ВОЗДУХА НА ПРОЦЕСС КИПЕНИЯ ЖИДКОЙ ПЛЁНКИ, УВЛЕКАЕМОЙ ПОТОКОМ ГАЗА

Лобасов А.С.^{1,2}, Минаков А.В.^{1,2}

¹Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79
²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Охлаждение микроэлектронного оборудования на сегодняшний день является одной из важнейших проблем теплофизики. Существующие электронные микрочипы уже сейчас выделяют тепловые потоки на уровне 100 Вт/см², а, по многим прогнозам, в ближайшем будущем тепловые потоки в горячих точках оборудования будут приближаться к 1000 Вт/см² [1]. Поэтому дальнейший рост производительности микропроцессоров напрямую зависит от решения проблемы теплоотвода, которая является одной из ключевых в современной электронике. Однако, традиционными способами удаётся рассеивать порядка 200 Вт/см², что явно недостаточно [2], поэтому широкое распространение получили мини- и микроканальные проточные теплообменники с характерными поперечными размерами меньше 1 мм.

В работе была проведена серия расчетов для задачи кипения в испарительной ячейке в трехмерной постановке. Рабочий участок представляет собой плоский канал, длиной 10 см и высотой - 1 мм. На боковых стенках устанавливались периодические граничные условия, таким образом геометрия задачи представляла собой щелевой канал бесконечной ширины. Длина нагревателя – 1 см. На нём задавалась постоянное значение температуры – 126°С. На входе задавались постоянные значения скоростей воды и воздуха, числа Рейнольдса для которых были, соответственно, равны $Re_l = 33,2$ и $Re_g = 912,8$ и $Re_l = 165,9$ и $Re_g = 1521,3$. Было проведено исследование влияния различия в расходах газа и жидкости на процесс кипения в данной испарительной ячейке. Входные температуры как воздуха, так и воды были равны 27°С. Краевой угол смачивания между паром и водой был равен 160°. Коэффициент диффузии пара в воздухе был равен $2,88 \times 10^{-5}$ м²/с. Также учитывалось наличие силы тяжести, вектор которой направлен от верхней стенки вниз к нагревателю.

Для моделирования гидродинамики и тепломассообмена использовался метод численного решения системы уравнений Навье-Стокса, дополненной уравнением массопереноса (модель Lee), с применением VoF- метода. В результате расчётов были получены как качественные картины движения жидкости и газов и процессов фазового перехода, прорыва плёнки пузырями пара, распад плёнки, образование сухих пятен и их замывание, так и количественные значения плотности теплового потока на нагревателе, а также объёмной доли пара.

В результате расчётов были получены как качественные картины движения жидкости и газов и процессов фазового перехода, прорыва плёнки пузырями пара, распад плёнки, образование сухих пятен и их замывание (см. рис. 1), так и количественные значения

плотности теплового потока на нагревателе (рис. 2). Было показано, что с увеличением скорости движения фаз количество сухих пятен на поверхности нагревателя уменьшается, а пузырьков пара – увеличивается. Это приводит к образованию более мелких волн на поверхности плёнки.

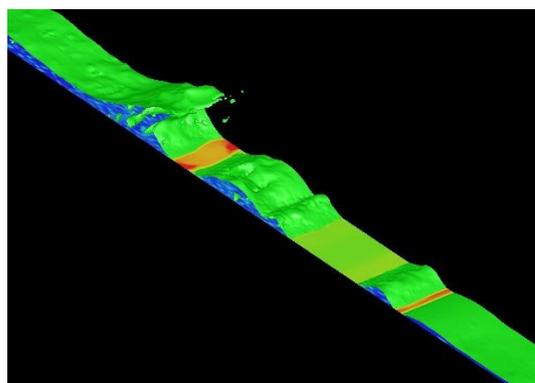


Рис. 1. Профиль жидкой плёнки через 65,8 мс после начала процесса, $Re_l = 33,2$, $Re_g = 912,8$.

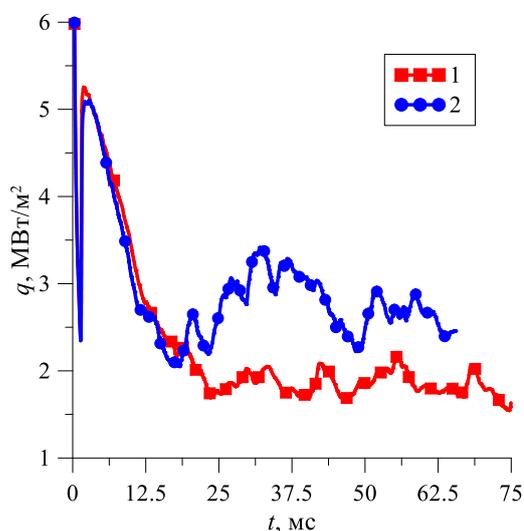


Рис. 2. Зависимость от времени плотности теплового потока на нагревателе: 1 – $Re_l = 33,2$, $Re_g = 912,8$; 2 – $Re_l = 165,9$, $Re_g = 1521,3$.

Список литературы:

1. Bar-Cohen K.A., Wang P. Thermal Management of On-Chip Hot Spots // J. Heat Transfer, vol. 134, art. № 051017, 2012.
2. Kraus A., Bar-Cohen K.A. and Wative A.A. "Cooling electric equipment" in vol. 4 of Mechanical Engineers Handbook (Wiley, Chichester, 2015), Sec. 1. Ch. 12, pp. 451–499.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00695)

УДК 532.5, 532.526, 66.063.8

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЛИЧИЯ УСЛОВИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ НА СТЕНКАХ Т-ОБРАЗНОГО МИКРОКАНАЛА НА РЕЖИМЫ СМЕШЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ

Лобасов А.С.^{1,2}, Минаков А.В.^{1,2} Рудяк В.Я.^{2,3}

¹Сибирский федеральный университет
660074, Российская Федерация, Красноярск, пр. Свободный, 79

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

³Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
630008, Новосибирск-8, ул. Ленинградская, 113

Среди всевозможных форм микромиксеров и микрореакторов очень распространены миксеры Т-типа. В цикле работ [1-3] были рассмотрены режимы течения и смешения двух жидкостей в Т-образном микроканале с высотой 200 мкм и с шириной канала смешения и подводящих каналов 400 мкм и 200 мкм в зависимости от числа Рейнольдса, и было обнаружено, что поведение течения двух одинаковых по свойствам жидкостей можно охарактеризовать следующим образом: $Re < 5$ – стационарное стратифицированное течение; $5 < Re < 145$ – стационарное вихревое симметричное течение (втягивающий режим); $145 < Re < 240$ – стационарное вихревое несимметричное течение; $240 < Re < 400$ – нестационарное периодическое течение. Также в этих работах было показано, что режимы течения и смешения существенно зависят от теплофизических свойств смешиваемых жидкостей, в особенности от вязкости и плотности.

Отличительной особенностью течения в микроканалах является наличие очень высоких значений перепада давлений в них вследствие малых значений поперечного сечения канала. Одним из возможных путей решения проблемы снижения потерь на трение является создание на стенках микроканала условий скольжения. Поэтому в данной работе было проведено исследование влияния коэффициента скольжения k_1 (длина скольжения [м]) на течение и смешение двух жидкостей в Т-образном микроканале. Способ задания коэффициента скольжения k_1 на стенке взят из работы [4]. Было рассмотрено два случая: 1) Температура жидкости на одном входе задавалась равной 27°C, на другом входе – 55°C; 2) Температуры обеих жидкостей на входах были равны 41°C. Число Рейнольдса варьировалось от 1 до 300.

В результате расчётов было обнаружено, что для случая одинаковых температур с увеличением коэффициента скольжения эффективность смешения в области до наступления втягивающего режима практически не меняется, а в области после наступления втягивающего режима – увеличивается (см. рис. 1а). Для случая различных температур эффективность смешения в области до наступления втягивающего режима уменьшается, а в области после наступления втягивающего режима, наоборот, увеличивается (см. рис. 1б), таким образом сказывается различие в вязкостях и плотностях жидкостей. Причём критическое число Рейнольдса перехода к втягивающему режиму остаётся одним и тем же для обоих случаев. Перепад давлений в канале смешения в обоих случаях уменьша-

ется с ростом коэффициента скольжения, причём существенно (см. рис. 2). Такой результат был ожидаем и закономерен.

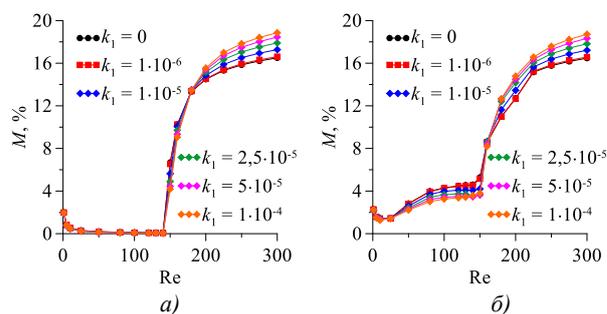


Рис. 1. Зависимость эффективности смешения при одинаковых (а) и различных (б) начальных температурах от числа Рейнольдса при различных значениях k_1 .

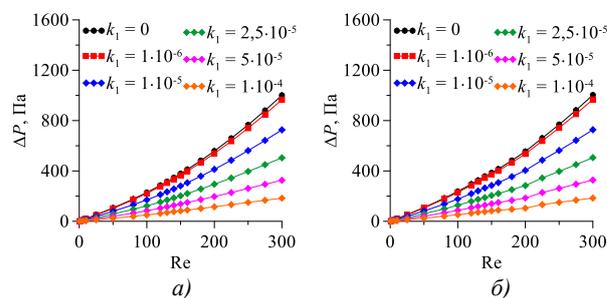


Рис. 2. Зависимость перепада давлений в канале смешения при одинаковых (а) и различных (б) начальных температурах от числа Рейнольдса при различных значениях k_1 .

Список литературы:

1. Lobasov A.S., Minakov A.V. Analyzing mixing quality in a T-shaped micromixer for different fluids properties through numerical simulation // Chemical Engineering & Processing: Process Intensification. 2018. V. 124. pp. 11-23.
2. Lobasov A.S., Minakov A.V., Kuznetsov V.V., Rudyak V.Y., Shebeleva A.A. Investigation of mixing efficiency and pressure drop in T-shaped micromixers // Chemical Engineering & Processing: Process Intensification. 2018. V. 134. pp. 105-114.
3. Lobasov A.S., Shebeleva A.A. Initial temperatures effect on the mixing efficiency and flow modes in T-shaped micromixer // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. V. 899. art. no. 022010.
4. Lobasov A.S., Minakov A.V. Rudyak V.Y. The investigation of the velocity slip and the temperature jump effect on the heat transfer characteristics in a microchannel // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. V. 31. art. № 101791. P. 1-13.

Работа выполнена при поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-575)

УДК 548.562

**ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ SDS НА ОБРАЗОВАНИЕ ГИДРАТА УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА
В КОЛЛОИДНОМ РАСТВОРЕ ВОДА + SDS + SiO₂****Мелешкин А.В., Марасанов Н.В., Щемелева Е.Е.**

Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Газовые гидраты представляют собой твердые кристаллические соединения, состоящие из молекул газа, заключенных в полость, образованную молекулами воды, связанными водородными связями. Процесс гидратообразования происходит при определенных термодинамических условиях, требуется низкая температура и высокое давление в системе. Газогидраты обладают массой полезных свойств: в них можно концентрировать большие объемы газа (до 170 объемов в одном объеме газогидрата); каждый конкретный газ имеет исходные условия термобарической стабильности; они могут существовать при положительных температурах; разлагаются на воду и газ при незначительном повышении температуры и сбросе давления. Все это достаточно давно привлекает специалистов к изучению газовых гидратов с целью их использования в промышленности. Они могут быть полезны и для задач опреснения и очистки воды, хранения газа, холодного хранения и т.д. Было разработано множество процессов для сепарации конкретного газообразного компонента из многокомпонентного газового потока. К таким процессам относятся абсорбция, адсорбция, мембранное разделение, но все эти процессы являются очень энергозатратными, поэтому сохраняется интерес к разработке менее энергоемких процессов. Технологии, основанные на процессе гидратообразования, могут быть полезны и для решения экологических аспектов, связанных с антропогенными выбросами углекислого газа в атмосферу. Хотя гидратообразование и обладает многими полезными свойствами, технологии промышленного применения этого процесса пока не существует из-за его сложности. В настоящее время ведутся исследования физико-химических свойств и термодинамических условий образования гидратов при добавлении различных промоторов.

Новизной данной работы является исследование сочетания физических и химических промоторов для повышения эффективности процесса гидратообразования за счет одновременного добавления пористого нанопорошка SiO₂ и промотора кинетики SDS.

Исследования проводились на установке типа «автоклав». Установка представляет собой сосуд цилиндрической формы, выполненный из нержавеющей стали, с рабочим объемом диаметром 100 мм и высотой 300 мм. Максимальное рабочее давление составляло 25 МПа. Перемешивание рабочей части осуществлялось с помощью встроенной в рабочую часть магнитной муфты и трехлопастного вала мешалки с плавным регулированием скорости до 1480 об/мин. Охлаждение осуществлялось пропусканием теплоносителя от криотермостата LOIP FT-316-40 через жидкостную рубашку охлаждения, расположенную на

внешней поверхности корпуса, измерение температуры осуществлялось с помощью термосопротивления Pt100, в качестве датчика давления выступал ОВЕН ПД-100. Сброс давления был контролируемым и осуществлялся с расходом 100 л/мин.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Коллоидный раствор готовили из воды, наночастиц SiO₂ и додецилсульфата натрия (SDS). Процесс получения коллоидного раствора осуществлялся двухстадийным методом. В дистиллированную и деионизированную воду добавляли необходимое количество наночастиц SiO₂ и SDS и интенсивно перемешивали. Далее смесь обрабатывали в ультразвуковой ванне в течение часа при температуре 70 °С. Было приготовлено 4 образца с различной концентрацией SDS (0-500 ppm) и постоянной концентрацией SiO₂ 100 ppm.

Температура рабочей зоны установки охлаждалась теплоносителем с температурой -1 °С, затем в автоклав помещали коллоидный раствор массой 300 г, в результате чего он начинал остывать. При достижении раствором температуры 4 °С в объем автоклава из баллона подавали углекислый газ до достижения давления 3 МПа. Далее происходило растворение углекислого газа и давление падало на несколько атмосфер. После прекращения падения давления и, соответственно, прекращения процесса растворения углекислого газа в воде, углекислый газ вновь подавался в рабочую часть до тех пор, пока давление в системе не достигало 3 МПа. После этого включали перемешивание коллоидного раствора и углекислого газа с частотой 450 об/мин, в результате чего температура в рабочей зоне повышалась в следствие выделения тепла в процессе газогидратообразования. По завершению роста гидрата криостат переводился в режим нагрева, повышая температуру рабочего объема автоклава, что приводило к разложению образовавшегося гидрата. По избыточному давлению, возникающему в следствие высвобождения газа, определялась масса высвобожденного газа и его доля относительно начальной массы газа.

Было проведено экспериментальное исследование по влиянию SDS на процесс образования гидрата углекислого газа в коллоидном растворе вода + SiO₂. В работе представлено 4 эксперимента с концентрацией SDS 0, 100, 300 и 500 ppm, концентрация SiO₂ при этом постоянна и составляет 100 ppm.

Наилучший результат был достигнут без SDS, при котором конверсия коллоидного раствора в воду составила 26,9%.

Работа поддержана РНФ (грант № 22-19-00428).

*Ссылка на информацию о проекте:
<https://rscf.ru/project/22-19-00428/>*

УДК 621.9

КИНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕЧЕНИЯ ВОКРУГ ЛЕВИТИРУЮЩЕЙ МИКРОКАПЛИ

Морозов А.А., Зайцев Д.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Явление левитации микрокапель (размером порядка 1-10 мкм) вблизи поверхности нагретой жидкости впервые качественно было описано В. Шефером в 1971 году. Механизм образования капель связан с восходящим движением горячей паровоздушной смеси (поток Стефана) в область более низкой температуры, где образуются капли конденсата. Эти капли продолжают расти за счет конденсации и двигаться вниз под действием силы тяжести. В какой-то момент поток Стефана уравнивает гравитацию, и в конечном итоге капли левитируют над поверхностью, часто создавая большие упорядоченные массивы. Данное явление имеет ряд практических приложений от химического производства до медицины (взаимодействие аэрозолей с дыхательными путями).

В данной работе впервые для анализа течения вокруг микрокапли используется метод прямого статистического моделирования методом Монте-Карло [1]. Этот метод позволяет получить детальную информацию о процессах в области течения на молекулярном уровне с учетом возможной неравновесности функции распределения частиц по скоростям, однако его использование требует значительных временных и вычислительных ресурсов. Течение вблизи капли микронного размера при атмосферном давлении характеризуется числом Кнудсена 0,05, что оправдывает применение кинетического подхода к решению данной задачи. Ранее этот метод применялся для решения близких задач по определению сил, действующих

Задача решается в двумерной плоской постановке. задается прямоугольная область размером 5 на 5 мкм, разделенная на квадратные ячейки. Область заполнена модельным газом с массой частиц 29 а.е.м., что соответствует воздуху. В центре области расположена цилиндрическая капля диаметром 1 мкм, с поверхности которой происходит испарение модельных частиц с массой 18 а.е.м., что соответствует воде. Внутренние степени свободы рассматриваемых модельных частиц в расчете не учитываются. Используется модель твердых сфер. Предполагается одинаковое сечение столкновений для молекул воздуха и воды всех модельных частиц, которому соответствует средняя длина пробега частиц 0,05 мкм для атмосферного давления газа.

Нижняя граница области расчета соответствует твердой или жидкой поверхности. Случай твердой поверхности соответствует левитации микрокапли над сухой поверхностью, и в этом случае имеет место диффузное отражение всех частиц от поверхности. Случай жидкой поверхности соответствует левитации

микрокапли над тонкой пленкой жидкости, и в этом случае имеет место отражение частиц воздуха от поверхности, поглощение частиц воды и испарение частиц воды с параметрами, соответствующими температуре жидкости. На границах области слева, справа и вверху задается поглощение всех частиц и входной поток частиц воздуха с параметрами, соответствующими начальным условиям моделирования. Также на границе слева может задаваться зеркальная поверхность, что соответствует моделированию двух одинаковых микрокапель на одинаковой высоте от поверхности.

С поверхности испарения на микрокапле или на нижней границе задается постоянный поток частиц воды. Для скоростей испаряющихся частиц задается полумаксвелловская функция распределения. Давление насыщенного пара воды на поверхности задается равной 0,5 атм, что приблизительно соответствует температуре 85°C. Температура молекул воздуха на границах расчетной области задается равной 20°C. Коэффициент испарения / конденсации для молекул воды задается равным 0,1.

Для моделирования столкновений между частицами используется схема без счетчика времени. Отдельно рассматривается три вида частиц: (1) молекулы воздуха, (2) молекулы воды, испаренные с поверхности микрокапли и (3) молекулы воды, испаренные с жидкой поверхности внизу. Рассчитываются поля концентрации, скорости и температуры воздуха и паров воды. Проведены тестовые расчеты течения газа вокруг микрокапли над сухой и влажной поверхностью. Показано, что имеет место существенное уменьшение концентрации воздуха вблизи капли и жидкой нижней поверхности. При этом, несмотря на поглощение на поверхности капли молекул пара, испарившихся с жидкой поверхности снизу, суммарный поток пара направлен от капли, что свидетельствует об уменьшении капли со временем за счет испарения для данного режима.

Список литературы:

1. Bird G. Molecular gas dynamics and direct simulation of gas flows. Oxford: Clarendon Press, 1994.
2. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы / Ю.И. Давыдов, Б.В. Дзюбенко, Г.А. Дрейцер и др.; Под ред. В.М. Иевлева. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
3. Суржиков С.Т. Перенос излучением в неоднородном слое// ТВТ. 1997. Т. 35. № 3. С. 1-2.

*Работа выполнена при поддержке РФФ
(грант № 23-29-00982)*

УДК 538.9

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВОДЫ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ

Морозова М.А.¹, Осипов А.А.¹, Максимовский Е.А.², Зайковский А.В.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3

Добавление углеродных наночастиц в теплоносители, используемые в солнечных коллекторах, может существенно повысить их эффективность. Практическое применение таких теплоносителей ограничено проблемой получения стабильных наножидкостей на основе углеродных наноматериалов. В данной работе исследована стабильность наножидкостей, полученных двухстадийным методом: на первом этапе синтезированы различные типы углеродных наночастиц, затем проведена стабилизация наночастиц базовой жидкости.

Были синтезированы углеродные глобулы и графеновые хлопья с использованием электродугового реактора плазмохимического синтеза наноматериалов, подробно описанного в [1]. Для синтеза углеродных глобул камера реактора была заполнена гелием, давление которого является одним из ключевых параметров, управляющих процессом синтеза наноматериалов и формируемой структурой. В данной работе давление гелия составляло 3, 12, 25, 50, 100, 200 Торр. Использование распыляемого графит-кремниевый анода при давлении гелия 12 Торр в электродуговом реакторе позволило синтезировать графеновые хлопья. Синтезированные материалы были исследованы различными методами структурного анализа.

Для каждого типа синтезированных наноматериалов были получены наножидкости на основе воды с массовыми концентрациями частиц от 0,02% до 0,2%. Для стабилизации наночастиц в воду было добавлено поверхностно-активное вещество додецилсульфат натрия (SDS). Стабильность наножидкостей определялась путём анализа изменения спектров поглощения наножидкостей с течением времени. Исследовано влияние концентрации наночастиц и SDS на стабильность наножидкостей. Были определены концентрации наночастиц и SDS для получения наножидкостей, сохраняющих стабильность более 1 месяца.

Данная работа выполнена с использованием оборудования УНУ ВГК ИТ СО РАН. Авторы работы благодарят ЦКП ВТАН НГУ за проведение исследований методом ПЭМ.

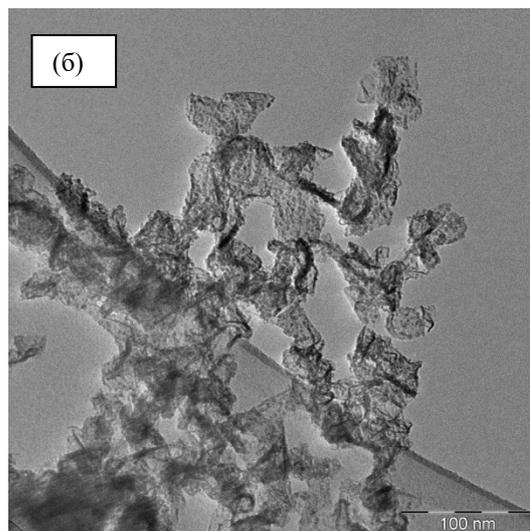
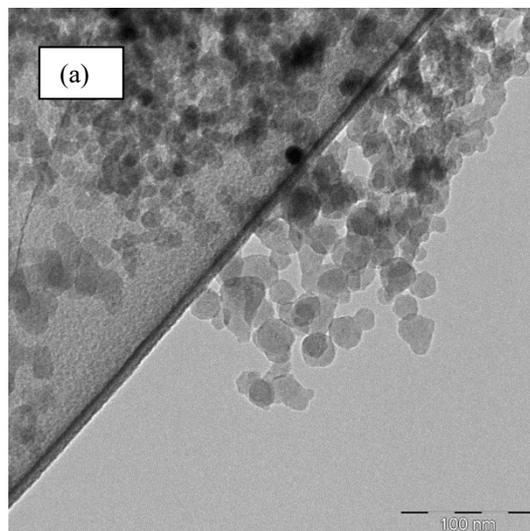


Рис. 1. Снимки просвечивающей электронной микроскопии углеродных глобул (а) и графеновых хлопьев (б).

Список литературы:

1. Zaikovskii A.V., Kardash T.Y., Kolesov B.A., Nikolaeva O.A. Graphene, SiC and Si Nanostructures Synthesis During Quartz Pyrolysis in Arc-Discharge Plasma // Phys. Stat. Sol. A. 2019. T. 216. № 14. С. 1900079-1-1900079-8.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00139, <https://rscf.ru/project/22-79-00139/>

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СЛИЯНИИ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА НАГРЕВАЕМОЙ ТОНКОЙ ФОЛЬГЕ

Мурадов Э.Б., Чеведа В.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Аннотация

В данной работе рассматривается гидродинамика и теплообмен в капле жидкости при падении, и слиянии двух капель на изотермической и нагреваемой поверхности. С помощью скоростной видеокамеры фиксируются динамические процессы, а с помощью тепловизора измеряется температура на нижней поверхности фольги.

Введение

За последние несколько десятилетий бурного развития электронной промышленности произошло много изменений. Электронная промышленность сейчас присутствует повсеместно в нашей жизни. Современная электроника стремится уменьшить размеры устройств, но повысить производительность, что в свою очередь увеличивает потребность в системе охлаждения. Таким образом, одной из основных проблем является увеличение коэффициента теплоотдачи. В настоящее время используются технологии охлаждения, такие как естественная конвекция, системы воздушного охлаждения, жидкостно-иммерсионные и пленочные охлаждения. Они не обладают достаточно эффективной теплоотводящей способностью. Создание системы охлаждения, отвечающей тенденциям современной электроники, является одной из актуальных задач современной науки.

Смачивание жидкостью твердой поверхности является наиболее простым и удобным случаем для изучения процессов в контактной линии, и этот случай помогает нам изучать трехфазную линию смачивания «газ-жидкость-твердое тело». Исследование жидких капель (распыление, испарение, динамика, смачивание и др.) получили большое внимание в научной литературе. [1]. Теплообмен в испаряющейся капле на горизонтальной нагретой поверхности изучался в [2], [3], [4]. Несмотря на развитие современных методик, эти работы не объясняют полностью процессы в контактной линии.

Экспериментальная установка

Проведено экспериментальное исследование процесса падения капли жидкости на нагреваемую горизонтальную подложку (рисунок 1). Экспериментальная установка состояла из фольги толщиной 25 мкм, длиной и шириной 80×35 мм² из константана (CuNi) теплопроводностью 23 Вт/(К·м). Подложка с помощью латунных электродов-держателей была подключена к источнику питания постоянного тока. Таким образом осуществлялся нагрев фольги и регулировалась тепловая мощность, выделяемая на фольге, в диапазоне от 0,2 до 2 Вт. В экспериментах температура поверхности фольги изменялась в диапазоне 25 – 35°С. Температура окружающей среды составляла

25°С. Температура фольги измерялась с помощью тепловизора TitaniumHD 570 M. Обратная сторона фольги была покрыта слоем черной графитовой краски. Средний коэффициент теплоотдачи от поверхности фольги к окружающему воздуху находился в пределах 16 – 20 Вт/м²·К. Капля подавалась на фольгу с помощью шприцевого насоса Cole-Parmer EW-74905-54 и шприца Hamilton 50 мл. Для наблюдения процесса слияния капель использовалась скоростная видеокамера Mega speed MS140K. Тепловая мощность, выделяемая на фольге, изменялась с помощью источника питания TTi QPX 1200L. В качестве жидкости использовалась дистиллированная и деионизированная вода. Процесс падения капли фиксировался с использованием высокоскоростной камеры Mega speed MS140K.

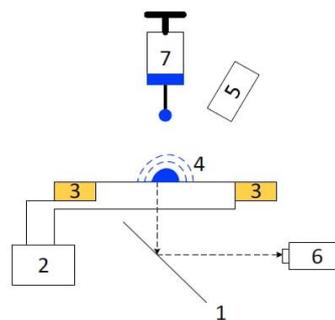


Рис. 1. 1 – зеркало, 2 – источник питания, 3 – латунные электроды, с натянутой между ними константановой фольгой (25 мкм), 4 – испаряющаяся жидкая капля, 5 – высокоскоростная камера Mega speed MS140K, 6 – ИК сканер Titanium 570M, 7 – Шприцевой насос.

Результаты

По результатам экспериментов на нагреваемой фольге определена динамика температуры при падении капли и при слиянии двух капель. Тепловой поток при слиянии двух капель немного выше, чем при падении одной капли.

Список литературы:

1. Zhang L., Li Z.-D., Zhao J.-F., Rebound of Liquid Droplets Caused by Sudden Decrease of Gravity // IPHT. 2014. Vol. 2 (1). pp. 41–54.
2. Moraila-Martínez C.L., Cabrerizo-Vilchez M.A., Rodríguez-Valverde M.A. Controlling the Morphology of Ring-Like Deposits by Varying the Pinning Time of Driven Receding Contact Lines // IPHT. 2013. Vol. 1 (1). pp. 195–205.
3. Padday J.F. Sessile Drop Profiles: Corrected Methods for Surface Tension and Spreading Coefficients // Proc. R. Soc. Lond. A. 1972. No. 330. pp. 561–572.
4. Финн Роберт, Равновесные капиллярные поверхности. Математическая теория. М.: Мир, 1989. 312 с.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-79-10373

УДК 536.242

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ БИФИЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ НА ОСАЖДЕНИЕ КОЛЛОИДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЛИ НАНОЖИДКОСТИ

Науменко А.Б.^{1,2*}, Иванова А.А.^{1,2}, Миськив Н.Б.^{1,2}, Старинский С.В.^{1,2}, Старинская Е.М.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

В настоящее время, в различных областях: от терморегуляции тела человека до биомедицины, используется процесс осаждения частиц коллоидного раствора при испарении на структурированной поверхности. Однако, для достижения желаемого осадка необходимо учитывать внешнее воздействие. Например, гравитационная сила оказывает существенное влияние на динамику испарения и осаждения наножидкости [1].

Во-первых, гравитационная сила влияет на распределение и перемещение частиц во время испарения. Другими словами, во время испарения коллоидные частицы перемещаются, следуя потокам, которые образовались в испаряющейся капле. В не наклоненной капле на процесс испарения влияет только капиллярный поток, который оставляет кольцеобразные отложения. С приложением, гравитационной силы возникает второй поток, направленный по радиусу в направлении силы тяжести. Подобные изменения сказываются на изменении характера отложений. Одним из основных применений этого эффекта, может быть, создание новых материалов с повышенной устойчивостью к воздействию различных факторов и уникальными оптическими свойствами, включая разработку ультратонких защитных пленок.

Кроме того, гравитационная сила воздействует на скорость испарения коллоидных растворов, асимметрию потока испарения и циркуляцию потока Марангони. Изучение этих свойств важно в автомобильной промышленности, 3D-печати и медицинской диагностике [2].

В последние годы испарение капель на неоднородных поверхностях вызывает большой интерес благодаря потенциалу применения в различных областях. Как сообщают недавние исследования, испарение капель на поверхностях со смешанной смачиваемостью приводит к изменению контактной линии. Таким образом, появляется возможность изменять коэффициент теплопередачи при помощи структурированной поверхности [3].

Изучение процесса испарения капель на бифильных поверхностях важно для проведения исследований в различных научных и технических дисциплинах. Благодаря особым свойствам таких поверхностей, их можно использовать для создания новых материалов и технологий. Данные свойства могут найти широкое применение в производстве микрочипов, биомедицине и 3D-печати.

В данной работе было проведено исследование влияния пространственной ориентации бифильной подложки на осаждение коллоидных частиц при испарении капли наножидкости. В нашем исследовании

были использованы уникальные сложно структурированные поверхности (бифильные) с контрастными смачивающими свойствами. Благодаря особой технологии создания такие поверхности позволяют проводить эксперименты по испарению капель, варьируя ориентацию поверхности в пространстве (рис. 1).

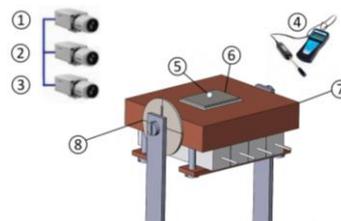


Рис. 1. Схема экспериментального стенда, где 1 тепловизионная камера, 2 камера для фиксирования размеров капли, 3 цифровой микроскоп, 4 термоанемометр, 5 исследуемая капля жидкости, 6 подложка с посадочным местом, 7 медная пластина, 8 поворотный механизм.

После полного высыхания каплю с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) был проведен анализ структуры отложения наночастиц на поверхности в зависимости от ориентации поверхности относительно гравитационных сил (рис. 2).

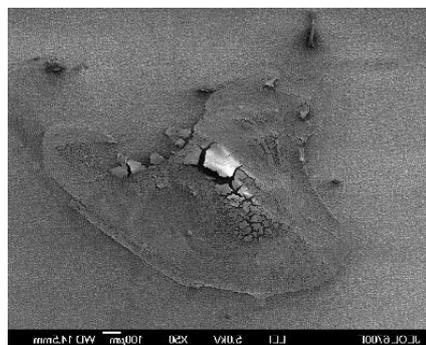


Рисунок 2. СЭМ снимок поверхности после высыхания капли наножидкости 0,1 % Fe₃O₄.

Список литературы:

1. Kim J.Y., Gonçalves M., Jung N., Kim H., & Weon B.M. (2021). Evaporation and deposition of inclined colloidal droplets. *Scientific Reports*, 11(1), 17784.
2. Dhar P., Dwivedi R.K., & Harikrishnan A.R. (2020). Surface declination governed asymmetric sessile droplet evaporation. *Physics of Fluids*, 32(11), 112010.
3. Aboubakri, A., Yanik, C., Akkuş, Y., Koşar, A., & Sadaghiani, A.K. (2020, July). Numerical and experimental investigation on evaporation of water droplet on surfaces with mixed wettability. In *International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels* (Vol. 83693, p. V001T06A002). American Society of Mechanical Engineers.

Работа выполнена за счет Мегагранта №075-15-2021-575

УДК 536.24

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА НАГРЕВАТЕЛЯ НА КРИТИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВОЙ ПОТОК В ПЛОСКИХ МИКРОКАНАЛАХ С ИНТЕНСИВНЫМ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ НАГРЕВОМ

Пуховой М.В., Белослудцев В.В., Зайцев Д.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Кипение позволяет просто и эффективно повысить плотность теплового потока, снимаемого с нагретой стенки. Кипение достаточно давно изучено для большого объема жидкости [1]. Активно ведется исследование проточного кипения в каналах и мини-каналах [2]. Однако исследования проточного кипения в микро-каналах связано с новыми задачами охлаждения электронного и микроэлектронного оборудования, в частности для 3D-плат, где возникает неоднородный нагрев по плоскости канала [3].

В работе выполнены систематические исследования динамики пузырей и теплообмена при кипении с неоднородным нагревом (ширина потока рабочей жидкости больше ширины нагревателя) в мини- и микроканалах высотой от 0,2 до 3,7 мм при различном недогреве воды. Эксперименты проводились при различных размерах нагревателя 3*3 и 10*10 мм², при этом ширина канала сохранена (30 мм). Эксперименты выполнены при интенсивном нагреве со стороны стенки (до 1 кВт/см² с нагревателя 10x10 мм² и до 1,6 кВт/см² с нагревателя 3x3 мм²).

Установлено, что с увеличением высоты канала в диапазоне 0,2 – 3,7 мм интенсивность теплообмена и критический тепловой поток существенно возрастают (см. Рис. 1).

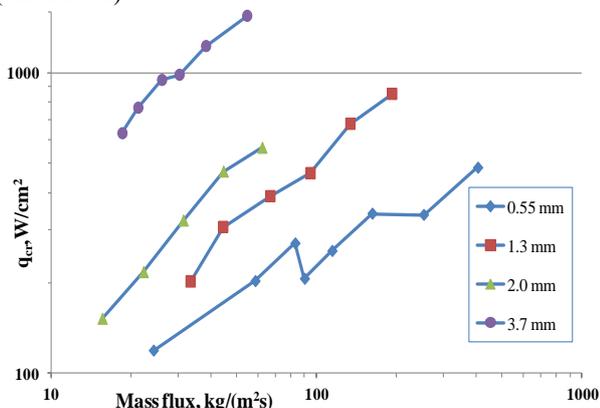


Рис. 1. Влияние удельного массового расхода (массовой скорости) воды и высоты канала (указана в легенде) на критический тепловой поток q_{cr} для нагревателя 3x3 мм² (ширина канала 30 мм).

Для заданного расхода жидкости и высоты канала критический тепловой поток на нагревателе 3x3 мм² превышает тепловой поток на нагревателе 10x10 мм², причем с увеличением высоты канала отличие возрастает (см. Рис. 2).

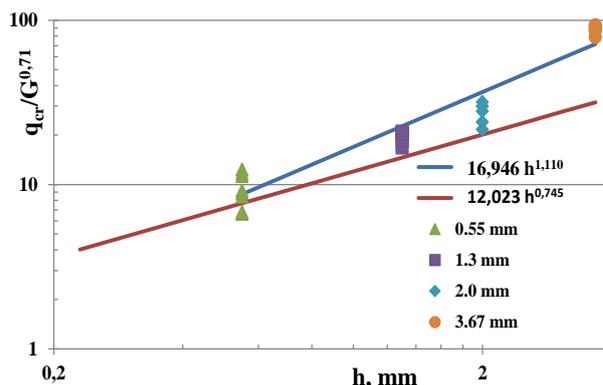


Рис. 2. Влияние высоты канала на приведенный критический тепловой поток для нагревателя 3x3 мм² (точки, синяя обобщающая линия) и нагревателя 10x10 мм² (красная обобщающая линия). Вода, ширина канала 30 мм, q_{cr} – критический тепловой поток (Вт/см²), G – массовая скорость (кг/м²с), h – высота канала.

В докладе будут представлены подробные результаты исследования кипения в каналах с неоднородным нагревом для воды. Так же будут представлены данные по визуализации процесса кипения и динамики пузырей с частотой съемки до 775 000 кадров в секунду.

Список литературы:

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М. Атомиздат, 1979, 416 с.
2. Liang G., Mudawar I. Review of channel flow boiling enhancement by surface modification, and instability suppression schemes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Т.146. С. 118864.
3. International Roadmap for Devices and Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2021 // [Электронный ресурс] - <https://irds.ieee.org/editions>.

Работа поддержана Российским Научным Фондом (грант № 22-49-08018)

УДК 621.373.826

ОСАЖДЕНИЕ ПРОЗРАЧНЫХ ПОКРЫТИЙ Al_2O_3 С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ СМАЧИВАНИЯ МЕТОДОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ АЛЮМИНИЯ В ФОНОВОМ КИСЛОРОДЕ

Родионов А.А.^{1,2}, Мельник А.В.^{1,2}, Суляева В.С.³, Шухов Ю.Г.¹, Васильев М.М.^{1,2}, Старинский С.В.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2³ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3

За последние 20 лет значительно возрос интерес к контролируемому изменению свойств смачиваемости, особенно к созданию супергидрофильных и супергидрофобных покрытий [1]. Такие покрытия имеют широкий спектр применения, включая улучшение сбора воды [2], предотвращение запотевания [3], защиту поверхностей от населения биоорганизмами [4] и применение в биомедицинском оборудовании, например, для уменьшения сопротивления катетеров и линз. Особое внимание уделяется супергидрофобным и супергидрофильным покрытиям, обладающим высокой прозрачностью, что значительно расширяет область их применения в солнечной энергетике, "умных" окнах, камерных объективах, оптоэлектронных устройствах и т.д.

Прозрачность и смачиваемость часто являются взаимоисключающими параметрами. С ростом шероховатости повышается вероятность рассеивания света, что может привести к снижению прозрачности покрытия. В то же время, повышение шероховатости поверхности может привести к увеличению смачиваемости, так как это позволяет жидкости легче проникать в структуру покрытия. При разработке прозрачных поверхностей с экстремальной смачиваемостью важно подобрать оптимальную комбинацию параметров и четко контролировать процесс осаждения наноструктур. Одним из методов тонкого контроля процесса синтеза покрытий является импульсная лазерная абляция (ИЛА) в газовой фазе.

В данной работе исследовано, как параметры лазерного синтеза влияют на оптические и смачивающие свойства наноструктур оксида алюминия. Для осаждения была использована вторая гармоника Nd:YAG лазера с длиной волны 532 нм и длительностью импульса 8 нс. Варьировались: давление фонового газа, число лазерных импульсов и температура. Анализ морфологии и поперечного сечения образцов проводился при помощи СЭМ, а оптические свойства измерялись спектрофотометрией.

В ходе исследования получены прозрачные наноструктуры Al_2O_3 с экстремальной смачиваемостью, анализировались их морфология, состав и оптические свойства. Получена зависимость контактного угла смачивания наноструктур Al_2O_3 от времени хранения

на воздухе (рис. 1). Установлено, что все покрытия имеют высокую пропускную способность в видимом диапазоне. При увеличении давления фонового кислорода наблюдается немонокотное изменение коэффициента пропускания, с минимумом при давлении $P_{O_2} = 80$ Па, обусловленным более развитой морфологией поверхности. Установлено, что увеличение числа актов лазерной абляции приводит к уменьшению коэффициента пропускания, что объясняется ростом толщины покрытий.

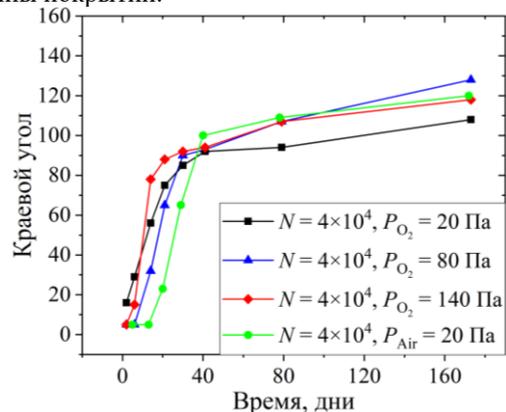


Рис. 1. эволюция контактного угла смачивания с течением времени.

Список литературы:

1. Drelich J., Marmur A., Physics and applications of superhydrophobic and superhydrophilic surfaces and coatings // Surf. Innov. 2014. V. 2. №4. P. 211–227.
2. Zhai L., Berg M. C., Cebeci F. C., Kim, Y., Milwid, J. M., Rubner, M. F., Cohen, R. E., Patterned superhydrophobic surfaces: toward a synthetic mimic of the Namib Desert beetle. Nano Letters. 2006. V. 6. № 6. P. 1213-1217.
3. Nie M., Patel P., Sun K., Meng D. D., Superhydrophilic anti-fog polyester film by oxygen plasma treatment // 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, IEEE. 2009. p. 1017-1020.
4. Baier R. E., Surface behaviour of biomaterials: the theta surface for biocompatibility // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. 2006. V. 17. № 11. P. 1057-1062.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного контракта с ИТ СО РАН

УДК 532.135, 532.584, 538.91

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИИ НАНОЖИДКОСТЕЙ**Рудяк В.Я.**

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,
630008, Россия, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Наножидкости, исследование которых активно развивается уже около тридцати лет, являются необычным дисперсным флюидом. Их свойства радикально отличаются от свойств обычных крупнодисперсных жидкостей. И вязкость, и теплопроводность наножидкостей не описываются классическими теориями Эйнштейна, Бэтчелора, Максвелла и др. Они зависят не только от концентрации дисперсных частиц, но также от их размера и материала. Связано это с тем, что дисперсные частицы в наножидкостях являются мезообъектами, и механизмы процессов переноса в них существенно отличаются от соответствующих процессов в крупнодисперсных жидкостях.

Оказалось, что примерно четверть всех обычных наножидкостей со сферическими частицами являются неньютоновскими [1]. С другой стороны, наножидкости с углеродными трубками (УНТ) как правило неньютоновскими [2]. Вместе с тем до сих пор не ясно, по каким причинам меняется реология. Не ясно, а может ли она меняться у обычных жидкостей. Цель настоящего доклада и состоит в изучении причин и механизмов изменения реологии наножидкостей и простых жидкостей. Рассматриваются как наножидкости с обычными сферическими наночастицами, так и с УНТ.

С этой целью сначала сделан большой обзор экспериментальных данных по изучению реологии наножидкостей. Изучено влияние на возможное изменение реологии наножидкостей концентрации наночастиц и УНТ, их размера, базовой жидкости и т.д. Во всех случаях рассматриваются наножидкости, в которых базовыми являются ньютоновские жидкости. Показано, что неньютоновские наножидкости являются псевдоили вязкопластичными. Переход к неньютоновости наблюдается с увеличением концентрации наночастиц, причем механизмы различны для наножидкостей со сферическими частицами и с УНТ. В первом случае наночастицы с увеличением концентрации наночастиц и уменьшением их размера формируют некоторую псевдорешетку, которая определяет затем собственный ближний порядок. Это показано во второй части работы методом молекулярной динамики.

В наножидкостях с УНТ формируется перколяционная структура. Ее формирование является пороговым явлением. Получены оценки критических концентраций перколяции. Показано, что они отличаются более чем на порядок для наножидкостей с одностенными и многостенными УНТ. Изучено влияние на реологию наножидкостей использования дисперсантов. Впервые объясняется, когда может появиться у наножидкости предельное напряжение сдвига. Установлено, как это определяется размером наночастиц, температурой наножидкости и другими факторами.

Вторая часть работы посвящена детальному изучению механизмов, определяющих трансформацию реологии наножидкостей. Используется неравновесный метод молекулярной динамики в варианте с моделированием течения Куэтта между двумя пластинами. Ячейка моделирования представляла собой прямоугольный параллелепипед. В направлениях, не ограниченных стенками, ставились периодические граничные условия. Стенки канала моделировались набором атомов меди, расположенных в узлах кубической кристаллической решетки. Стенкам сообщались постоянные и направленные в разные стороны скорости, в канале устанавливался линейный профиль скорости флюида. Коэффициент вязкости определялся по тензору сдвиговых напряжений и скорости сдвига. Изучена реология наножидкостей на основе бензола с частицами меди и алюминия размером 3 и 6 нм. Максимальная объемная концентрация частиц равнялась 6%.

Показано, что при низких скоростях сдвига и бензол, и все наножидкости являлись ньютоновскими, однако с ее ростом их реология менялась, они становились псевдопластичными. Установлено, что изменение реологии является пороговым явлением, и характеризуются некоторым критическим значением скорости сдвига. Эти значения зависят от концентрации наночастиц, их размера и материала. Критические значения скорости сдвига снижаются с уменьшением размера частиц и с увеличением их концентрации.

При фиксированной скорости сдвига вязкость наножидкости хорошо описывается квадратичной функцией концентрации частиц, параметры которой также являются функцией концентрации, размера частиц и скорости сдвига. Изучено структурирование наножидкости в процессе смены ее реологии. Показано, что структура наножидкости перестраивается и ближний порядок в ней ослабевает. Это приводит к тому, что с ростом скорости сдвига вязкость всех наножидкостей и чистого бензола стремится к одному значению, которое существенно ниже вязкости бензола в объеме. Показано, что это связано со сменой механизма переноса импульса в системе.

Список литературы:

1. Minakov A.V., Rudyak V.Ya., Pryazhnikov M.I. Rheological behavior of water and ethylene glycol nanofluids with oxide nanoparticles // *Colloids Surf. A: Phys. & Eng. Aspects*. 2018. V. 554. P. 279-285.
2. Rudyak V.Ya., Dashapilov G.R., Minakov A.V., Pryazhnikov M.I. Comparative characteristics of viscosity and rheology of nanofluids with multi-walled and single-walled carbon nanotubes // *Diamond & Related Mat.* 2023. V. 132. P. 109616.

*Работа поддержана Российским научным фондом
(соглашение № 20-19-00043)*

УДК 544.032.65

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ ЗОЛОТА НА ЛАЗЕНУЮ МЕТАЛЛ-ИНДУЦИРОВАННУЮ КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ АМОРФНОГО СУБОКСИДА КРЕМНИЯ

Самохвалов Ф.А.^{1,2}, Васильев М.М.^{1,2}, Родионов А.А.^{1,2}, Баранов Е.А.¹, Старинский С.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский Государственный Университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Тонкоплёночные поликристаллические полупроводниковые структуры – это основные материалы для современных технологий в микро- и нанoeлектронике, фотовольтаике. Из них получают диоды [1], резисторы, биполярные и полевые транзисторы, светочувствительные датчики, плёночные фотоэлементы и солнечные элементы на стекле [2]. На данный момент одним из основных методов получения плёнок полукристаллического кремния – термический отжиг плёнок аморфного кремния. У этого способа есть несколько недостатков. Во-первых – высокая температура отжига (более 600°C), что вынуждает выбирать тугоплавкие материалы в качестве подложки. Во-вторых – продолжительность процесса (более 10-ти часов). В-третьих – требовательность к окружающей среде, так как кремний очень легко вступает в реакцию с кислородом при высоких температурах.

Чтобы получать подобные структуры на дешёвых, легкоплавких подложках (стекло, пластик и т.д.) используется метод металл-индуцированной кристаллизации (МИК) [3]. В МИК металл выступает как катализатор кристаллической фазы при термическом отжиге, понижая необходимую температуру процесса на сотни градусов, в зависимости от выбранного металла. Для локальной кристаллизации и уменьшения нагрузки на подложку используется метод лазер-индуцированной кристаллизации (ЛИК) [4]. Однако, этот способ очень чувствителен к наличию неоднородностей, как на поверхности, так и внутри образца. Металл располагался под слоем аморфного кремния ($a\text{-SiO}_x$), как показано на рисунке 1.

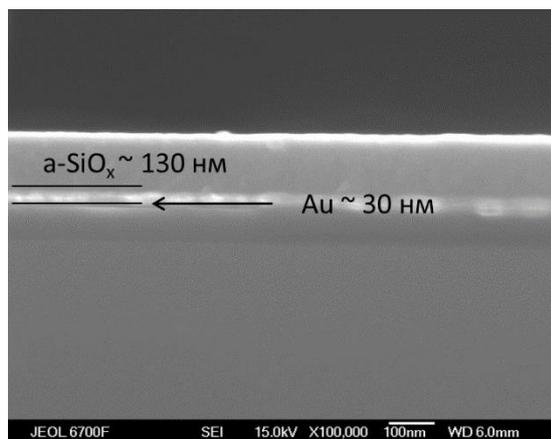


Рис. 1. Снимок сканирующего электронного микроскопа плёнки композитного материала $a\text{-SiO}_x + \text{Au}$.

Видно, что плёнка металла, толщиной порядка 30 нм непрерывная, что обеспечивает быстрый отток тепла из зоны нагрева.

Золото было выбрано в качестве донорного металла, так как обладает некоторыми свойствами. Во-первых – оно образует с кремнием точку эвтектики с самой низкой температурой (175°C [5]). Во-вторых – золото инертно, не образует силицидов в толще плёнки, не реагирует с кислородом в окружающей среде. В-третьих – высокая теплопроводность, что позволяет равномерно прогреть плёнку аморфного кремния, исключая деструкцию и испарения из-за локального перегрева. Так же, золото – один из самых популярных материалов для металл-индуцированной кристаллизации.

Настоящая работа представляет собой экспериментальное исследование по использованию комбинации методов МИК и ЛИК для кристаллизации субоксида кремния. Был изучен широкий диапазон условий лазерного облучения: видимое и инфракрасное излучение с наносекундной и пикосекундной длительностью импульса, в атмосфере и в вакууме.

Список литературы:

1. Brotherton S.D. Polycrystalline Silicon Thin Film Transistors (Poly-Si TFTs) // Handbook of Visual Display Technology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. P. 647–673.
2. Varlamov S. et al. Polycrystalline silicon on glass thin-film solar cells: A transition from solid-phase to liquid-phase crystallised silicon // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2013. Vol. 119. P. 246–255.
3. Toko K., Suemasu T. Metal-induced layer exchange of group IV materials // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. Vol. 53, № 37. P. 373002.
4. Bronnikov K. et al. Large-Scale and Localized Laser Crystallization of Optically Thick Amorphous Silicon Films by Near-IR Femtosecond Pulses // Materials (Basel). 2020. Vol. 13, № 22. P. 5296.
5. Pereira, L., Águas, H., Martins, R. M., Fortunato, E., & Martins, R. (2004). Polycrystalline silicon obtained by gold metal induced crystallization. Journal of NonCrystalline Solids, 338–340(1 SPEC. ISS.). 178–182.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-79-10079,
<https://rscf.ru/project/22-79-10079/> (диагностика
тонких пленок) и в рамках РФФИ и БРФФИ, грант
№ 20-58-04021 (лазерный отжиг тонких пленок)*

УДК 532.6:546.22

РАЗМЕРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ, УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦЫ СЕРЕБРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ “ПОГРУЖЕННОГО АТОМА”

Цыдыпов Д.Г., Номоев А.В., Гармаев Б.З.

Институт физического материаловедения СО РАН,
670047, Россия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

Известно, что работоспособность микроэлектронных устройств на основе наноструктур серебра зависит от их теплофизических свойств. Поэтому актуально исследование теплофизических свойств наноструктур серебра в зависимости от их размеров и структуры. В этой работе изучена термическая стабильность наночастиц серебра с помощью компьютерного моделирования методом молекулярной динамики. Одной из главных проблем моделирования является выбор межатомного потенциала, который сильно влияет на результат моделирования.

Исследовались сферические наночастицы серебра с различными диаметрами, обладающие гранцентрированной кубической решеткой. В ходе моделирования в качестве потенциалов для описания взаимодействий между атомами серебра использовались потенциалы [1], [2], [3], отвечающие методу “погруженного атома” (embedded atom method, EAM).

В ходе работы была определена температура плавления для различных размеров наночастицы для каждого используемого EAM-потенциала.

Для определения макроскопической температуры плавления серебра для каждого используемого EAM-потенциала были построены зависимости температуры плавления наночастицы серебра от обратного радиуса ($1/r$) наночастицы и была проведена линейная экстраполяция зависимостей к $g \rightarrow \infty$ (см. рис. 1).

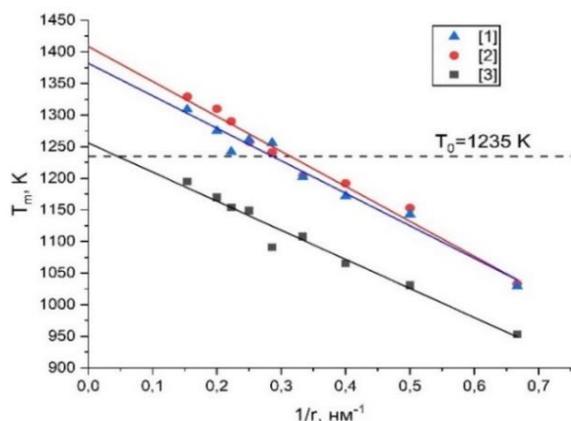


Рис. 1. Зависимости температуры плавления T_m наночастицы серебра от обратного радиуса ($1/r$) для различных EAM-потенциалов.

Макроскопическое значение температуры плавления серебра $T_m^{(\infty)} = 1382$ К при использовании потенциала [1] (отклонение от табличного значения (1235 К) составляет 11,9 %). При использовании потенциала

[2] $T_m^{(\infty)} = 1409$ К (отклонение составляет 14,1 %).

Для потенциала [3] $T_m^{(\infty)} = 1256$ К (отклонение 1,7 %).

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости удельной теплоты плавления наночастицы серебра от обратного радиуса ($1/r$) с использованием различных EAM-потенциалов.

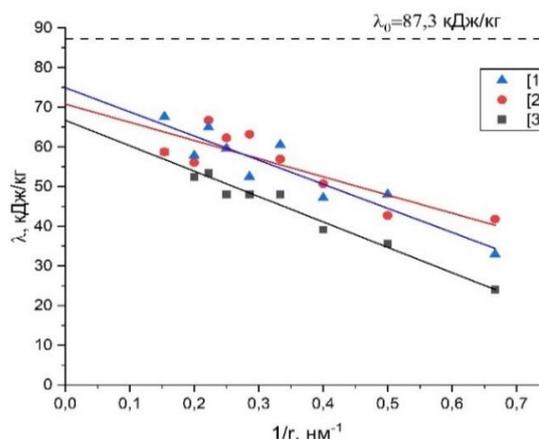


Рис. 2. Зависимости удельной теплоты плавления λ наночастицы серебра от обратного радиуса ($1/r$) для различных EAM-потенциалов.

Макроскопическое значение удельной теплоты плавления серебра $\lambda^{(\infty)} = 74,9$ кДж/кг при использовании потенциала [1] (отклонение от табличного значения (87,3 кДж/кг) составляет 14,2 %). Для потенциала [2] $\lambda^{(\infty)} = 70,8$ кДж/кг (отклонение равно 18,9 %). При использовании потенциала [3] $\lambda^{(\infty)} = 66,7$ кДж/кг (отклонение равно 23,6 %).

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости тщательного подбора параметров потенциала для наночастиц. Так, параметры потенциала [3] дают лучшее согласие с табличным значением макроскопической температуры плавления серебра ($T_0 = 1235$ К), но также дают наибольшее отклонение от табличного значения макроскопической удельной теплоты плавления серебра ($\lambda_0 = 87,3$ кДж/кг).

Список литературы:

1. Sheng H., Kramer M.J., Cadien A., Fujita T., Chen M. W. Highly optimized embedded-atom-method potentials for fourteen fcc metals // Physical Review B. 2011. V. 83. I. 13. P. [134118, 20 p.].
2. Williams P.L., Mishin Y., Hamilton J.C. An embedded-atom potential for the Cu–Ag system // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2006. V. 14. I. 5. P. 817-833.
3. Zhou X.W., Johnson R.A., Wadley H.N.G. Misfit-energy-increasing dislocations in vapor-deposited CoFe/NiFe multilayers // Physical Review B. 2004. V. 69. I. 14. P. [144113, 10 p.].

УДК 536.24

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА НА КОНДЕНСАЦИОННЫЙ РОСТ МИКРОКАПЕЛЬ ЛЕВИТИРУЮЩИХ НАД ТОНКИМ СЛОЕМ ЖИДКОСТИ

Шатекова А.И., Зайцев Д.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Явление левитации микрокапель имеет важное значение для термодинамики и может применяться в различных областях, начиная от химического производства и заканчивая медициной (аэрозоли, которые используются в лекарствах для воздействия на дыхательные пути). Левитирующие микрокапли жидкости могут организовываться в упорядоченные массивы, имеющие гексагональную структуру. Образование капель связано с поднимающимся потоком горячей паровоздушной смеси. При испарении слоя жидкости паровоздушная смесь движется вверх в область с более низкой температурой, где происходит конденсация капель. Капли движутся вниз под действием силы тяжести, пока эта сила не уравновесится потоком Стефана, и тогда капли начинают левитировать над поверхностью нагреваемой жидкости [1].

Целью работы является исследование влияния различных параметров эксперимента на конденсационный рост левитирующих микрокапель. Рабочий участок представляет из себя кювету с тонким слоем жидкости, на дне которой располагается заделанный заподлицо круглый нагревательный элемент диаметром 3 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась сверхчистая вода Milli-Q. Толщина слоя жидкости измерялась с помощью конфокального датчика IFS 2405 производства фирмы MicroEpsilon. Для того чтобы уменьшить влияние конвективных потоков в воздухе, рабочая зона была помещена в большой прозрачный контейнер размером 45 x 80 x 90 см.

Микрокапли жидкости, составляющие двумерный массив, продолжают увеличиваться в размере вследствие конденсации пара. На рис. 1 представлен график зависимости скорости конденсации капель от толщины слоя жидкости. Как видно из графика, в диапазоне толщин от 0,1 мм до 1 мм, скорость конденсационного роста капель практически не зависит от толщины слоя жидкости. Этот результат можно объяснить тем, что наши эксперименты проводятся при относительно небольших значениях температуры подложки. Результаты, представленные на рис. 1, были получены при температуре подложки $T_w=66\text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности окружающего воздуха 10 %. На рис. 2 представлен график скорости роста капель, в зависимости от относительной влажности. Данные приведены для одной температуры $T_w=66\text{ }^\circ\text{C}$ и толщины слоя жидкости $h = 0,6\text{ мм}$. Как видно из рис.2, с ростом относительной влажности, скорость роста капель уменьшается. Эту зависимость можно объяснить тем фактом, что с увеличением относительной влаж-

ности поток Стефана с поверхности жидкости уменьшается, а чем слабее поток Стефана, тем ниже скорость роста капель.

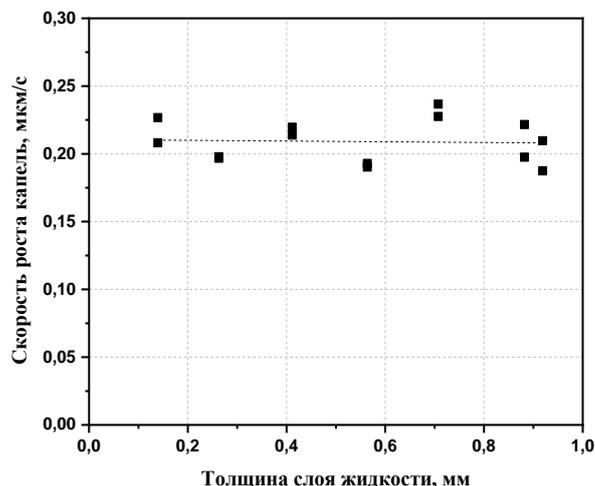


Рис. 1. Зависимость скорости роста капель от толщины слоя жидкости. $T_w=66\text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха 10 %.

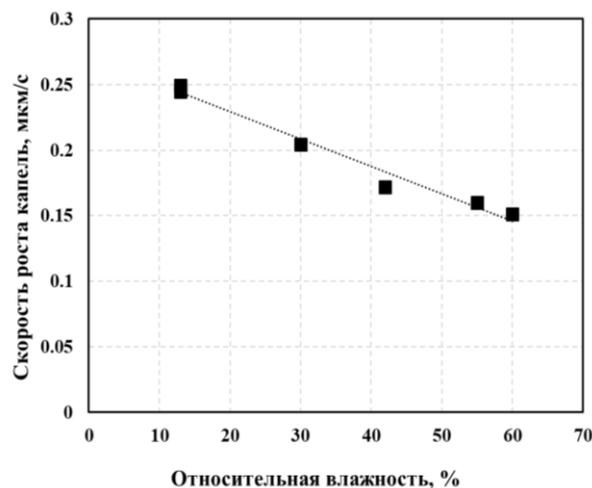


Рис.2. Зависимость скорости роста капель от относительной влажности воздуха. $T_w=66\text{ }^\circ\text{C}$, $h = 0,6\text{ мм}$.

Список литературы:

1. Zaitsev D., Kirichenko D., Ajaev V., Kabov O. Levitation and selforganization of liquid microdroplets over dry heated substrate // Physical Review Letters. 2017. Vol. 119. Article number 094503.

Работа выполнена при поддержке РФФ
(грант № 23-29-00982)

СЕКЦИЯ 9

Теплофизические свойства веществ и лучистый теплообмен

УДК 536.212:669.721.5

ПЕРЕНОСНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХЛЕГКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ И БИОРАЗЛАГАЕМЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ

Агажанов А.Ш., Хайрулин А.Р., Абдуллаев Р.Н., Самошкин Д.А., Козловский Ю.М.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящее время сплавы на основе магния вызывают растущий интерес в таких областях как транспорт и медицина. Благодаря низкой плотности и высокой прочности магниевые сплавы применяются при изготовлении легких конструкционных деталей для транспортных средств. Добавка кальция, как биологически нетоксичного и биосовместимого легирующего элемента, в магний улучшает коррозионную стойкость сплавов Mg-Ca [1] и приводит к более низкой скорости деградации по сравнению с другими биоматериалами на основе Mg [2]. Все это делает бинарные сплавы Mg-Ca одним из наиболее перспективных кандидатов на роль высокоэффективных биоразлагаемых имплантов [2]. Тем не менее, для внедрения новых материалов в различные высокотехнологические сферы деятельности и оптимизации технологий производства перспективных материалов на основе магния необходимы надежные данные по физическим свойствам не только чистых компонентов, но и их сплавов. Обзор имеющейся в литературе информации показал, что в уточнении нуждаются экспериментальные данные по многим теплофизическим свойствам сплавов Mg-Ca, особенно по коэффициентам переноса тепла, по которым практически отсутствуют какие-либо экспериментальные сведения, за исключением исследования по сплавам с крайне малым содержанием Ca (меньше 0,9 ат. %) [3].

Добавление в Mg-Ca сплавы самого легкого металла, лития, и поиск оптимальных составов для тройных сплавов Mg-Ca-Li представляются весьма привлекательными задачами для синтеза сверхлегких конструкционных материалов на основе Mg.

Целью настоящей работы являлось прецизионное измерение теплопроводности (λ) и температуропроводности (a) бинарного эвтектического сплава Mg₉₀Ca₁₀ (с содержанием Ca 10,5 ат. %) и тройной эвтектики Mg-Li-Ca (8,4 ат. % Ca; 19,1 ат. % Li; 72,5 ат. % Mg) в интервале температур твердого состояния.

Процедуры по приготовлению исследуемых сплавов осуществлялись в перчаточном боксе, заполненном высокочистым аргоном (99,992 об. %). Составные компоненты сплавов: навески магния МГ95 (99,95 масс. %), лития (99,95 масс. %) и дистиллированного кальция (99,75 масс. %), взвешивались на аналитических весах с точностью 2–3 мг и подбирались по массе для получения эвтектических составов. Ошибка определения составов не превосходила 0,02 ат. %. После подбора нужного состава металлы помещались в молибденовые ампулы, которые герметизировались в атмосфере бокса посредством электродуговой сварки. Далее герметичные ампулы устанавливались в гамма-плотномере [4], где их прогревали до 1200 К и выдерживали при этой температуре

4 часа. Гомогенность сплавов контролировались измерением коэффициента ослабления пучка гамма-излучения в образцах на различных высотах.

Эксперименты по измерению λ и a сплавов Mg₉₀Ca₁₀ и Mg₇₃Li₁₉Ca₈ выполнялись методом лазерной вспышки [5] на установке LFA-427 в интервале температур 300–700 К с погрешностью 3,0–3,4%. На рис. 1 представлены результаты по λ , полученные в ходе циклов нагрева–охлаждения образцов, вместе с температурными зависимостями и с данными для чистых металлов. Анализ литературы показал, что до настоящего времени измерения коэффициентов переноса тепла исследованных сплавов не проводились. В связи с этим, полученные в настоящей работе экспериментальные данные являются уникальными и могут быть рекомендованы в качестве справочных.

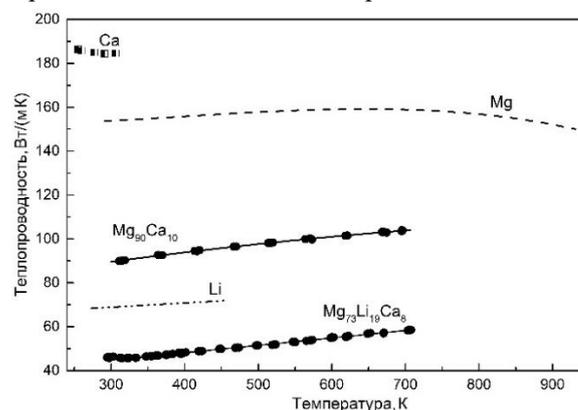


Рис. 1. Теплопроводность эвтектических сплавов Mg₉₀Ca₁₀, Mg₇₃Li₁₉Ca₈ и чистых металлов Mg, Ca и Li.

Список литературы:

1. Cho S.Y., Chae S.W., Choi K.W., et al. Biocompatibility and strength retention of biodegradable Mg-Ca-Zn alloy bone implants // J. Biomed. Mater. 2013. Vol. 101. No. 2. P. 201–212.
2. Jeong Y.S., Kim W.J. Enhancement of mechanical properties and corrosion resistance of Mg-Ca alloys through microstructural refinement by indirect extrusion // Corros. Sci. 2014. Vol. 82. P. 392–403.
3. Pan H., Pan F., Yang R., et al. Thermal and electrical conductivity of binary magnesium alloys // J. Mater. Sci. 2014. Vol. 49, No. 8. P. 3107–3124.
4. Abdullaev R.N., Khairulin R.A., Kozlovskii Y.M., et al. Density and Thermal Expansion of Magnesium–Calcium Alloys in Solid and Liquid States // Int. J. Thermophys. 2023. Vol. 44. No. 5. P. 44–74.
5. Agazhanov A.Sh., Abdullaev R.N., Samoshkin D.A., et al. Thermal conductivity and thermal diffusivity of Li-Pb eutectic in the temperature range of 293–1273 K // Fusion Eng. Des. 2020. Vol. 152, No. 111456. P. 1–5.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(проект № 20-79-10025,
<https://rscf.ru/project/20-79-10025/>)

УДК 536.441

КРИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИМЕТИЛОВЫХ ЭФИРОВ ЭТИЛЕНГЛИКОЛЕЙ – КОМПОНЕНТОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ CO₂

Богатищева Н.С., Попов А.П., Никитин Е.Д.

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Глобальное потепление диктует необходимость сократить выбросы углекислого газа. Один из путей решения этой проблемы – применение технологий улавливания и захоронения углерода (carbon capture and storage technology — CCS). Широко используемый в настоящее время метод химической абсорбции CO₂ водными растворами аминоспиртов требует больших затрат энергии, приводит к коррозии оборудования и способствует загрязнению окружающей среды. Применение неводных растворов для абсорбции углекислого газа помогает устранить некоторые из указанных выше недостатков. В качестве растворителей вместо воды можно использовать, в частности, диметиловые эфиры этиленгликолей (глимы), которые сами по себе являются физическими абсорбентами [1]. Таким образом, раствор алканоламин + глим является гибридным, т.е. поглощает углекислый газ как химический, так и физический абсорбент. Исследования показали, что поглощательная способность некоторых смесей аминоспиртов и глимов при определенных условиях выше, чем у водных растворов аминоалканолов [2].

Выбор абсорбента с оптимальными физическими свойствами имеет большое значение для разработки эффективной технологии поглощения углекислого газа. Поэтому важно провести исследование теплофизических свойств чистых органических растворителей и их смесей с аминами.

В докладе будут представлены результаты измерения критической температуры и критического давления четырех веществ, принадлежащих к гомологическому ряду глимов: диметиловых эфиров этиленгликоля, диэтиленгликоля, триэтиленгликоля, тетраэтиленгликоля).

Ранее критические параметры глимов за исключением диметилового эфира этиленгликоля никто не мерил, в частности потому, что эти вещества являются термонестабильными. Для экспериментального определения критической температуры и критического давления был применен метод импульсного нагрева проволочного зонда, помещенного в исследуемую жидкость [3]. Особенностью метода является сверхмалое время нагрева исследуемого соединения до критической температуры. Метод импульсного нагрева состоит в измерении температуры достижимого перегрева исследуемой жидкости в зависимости от давления (см. рис. 1). Критическая точка является общей вершиной бинодали и спинодали на фазовой диаграмме, и с ростом давления температура достижимого перегрева стремится к критической температуре. Температура достижимого перегрева измеряется с помощью платинового зонда диаметром 20 мкм, который служит одновременно нагревателем и термометром сопротивления. Длительность греющих импульсов составляла 35 – 850 мкс, за это время вещество не

успевало разложиться в процессе измерений. Погрешность измерения критической температуры – 1 %, критического давления – 3%. В эксперименте использовались образцы веществ с чистотой не менее 99 мол. %.

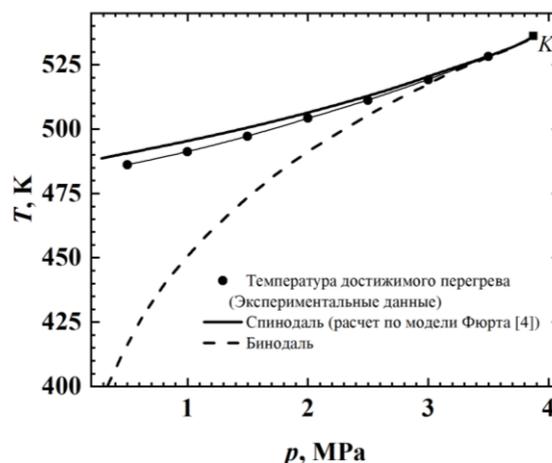


Рис. 1. Зависимость температуры достижимого перегрева диметилового эфира этиленгликоля от давления, К – критическая точка.

Экспериментальные данные по критическим свойствам, полученные в настоящей работе, сравнивались с результатами расчетов аддитивно-групповыми методами Марреро-Гани, Вилсона-Джасперсона, Константину-Гани, Хуккерикара и др. [5, 6].

Список литературы:

- Henni A., Tontiwachwuthikul P., Chakma A. Solubilities of Carbon Dioxide in Polyethylene Glycol Ethers // Can. J. Chem. Eng. 2005, V. 83, P. 358-361.
- Huang et al. An Aprotic Polar Solvent, Diglyme, Combined with Monoethanolamine to Form CO₂ Capture Material: Solubility Measurement, Model Correlation, and Effect Evaluation // Ind. Eng. Chem. Res. 2015, V. 54, P. 3430-3437.
- Никитин Е.Д., Павлов П.А. Методика ГСССД МЭ 163-2010. Методика экспериментального определения критической температуры и критического давления индивидуальных веществ. – М.: ФГУП «Стандартинформ» 2010.
- Метастабильная жидкость. / Скрипов В.П. М.: Наука. 1972. 312с.
- Poling B.E., Prausnitz J.M., O'Connell J.P. The Properties of Gases and Liquids. New York: McGraw-Hill, 2000.
- Hukkerikar A. S., Sarup B., Ten Kate A., Abildskov J., Sin G., Gani R. Group-contribution+ (GC+) based estimation of properties of pure components: improved property estimation and uncertainty analysis // Fluid Phase Equilib. 2012. V.521, P. 25–43.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 23-29-00723,
<https://rscf.ru/project/23-29-00723/>*

УДК 535.4; 536.7; 539.2

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

Дулин М.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Посвящается 90-летию академика Реброва Алексея Кузьмича

В предыдущем докладе [1] на СТС 38 был получен необычный результат, что **тепловое расширение** элементов таблицы Менделеева в твёрдом состоянии происходит путём обмена **квантами действия h** , как и было обнаружено Планком в далёком 1900 году, а не квантами энергии, как принято считать. Этот результат позволяет по-новому рассмотреть не только сам процесс теплового расширения, но и условия перехода твёрдого тела в жидкое и далее – газообразное состояние. А также рассматривать жидкое и газообразное состояния как пространство с дополнительной **симметрией вращения** по отношению к твёрдому.

В докладе рассматриваются следующие вопросы:

1) О похожести поведения объёмного коэффициента теплового расширения $\beta(T)$ и удельной теплоёмкости $C_p(T)$, обусловленных в первом случае якобы ангармоническими колебаниями атомов в кристалле, а во втором наоборот – гармоническими [графики Бодрякова В.Ю. для W на презентации].

2) О том, что в отличие от дебаевской аппроксимации для $C_p(T)$ с единственным параметром T_D , для коэффициента $\beta(T)$ удобнее использовать более простую и гибкую функцию $\beta(T) = P_{lin} \cdot T + P_{amp} \cdot [1 - \exp(-(T - T_{act})/T_{exp})]$ в виде суммы двух членов, но с двумя параметрами "свободных" параметров: P_{amp} , P_{lin} и T_{act} , T_{exp} , отражающих вклад атомных возбуждений – фононов и электронных возбуждений внутри атома [график функции $\beta(T)$ для элемента Sc].

3) О том, что полное расширение элементов таблицы Менделеева ΔV до температуры плавления T_{melt} имеет упорядоченный характер, где наиболее сильно расширяются щелочные и щелочноземельные металлы, а среди переходных $3d$ металлов – Mn с ровно наполовину заполненной оболочкой [график ΔV].

4) О том, что параметр T_{exp} можно считать внутренним масштабом энергии расширяющихся элементов, который зависит от полного числа электронов в атоме и его оболочечной структуры и который пропорционален температуре плавления T_{melt} и обратно пропорционален паре P_{amp} и P_{lin} [графики для $T_{exp} \cdot M$ и T_{exp} vs T_{melt}].

5) О том, что электроны через свой параметр P_{lin} определяют, насколько сильно меняется плотность элемента ρ к моменту плавления, а фононы через параметр P_{amp} – сколько тепла нужно потратить на переход элемента в жидкое состояние [безразмерный комплекс $P_{lin}(T_{melt})^2$ и график теплоты плавления ΔH].

6) О том, что график зависимости ΔH vs $1/P_{amp}$ указывает на природу жидкого состояния: такая теплота плавления нужна для возникновения дополнительного пространства с симметрией вращательного движения. Как показывают экспериментальные работы

академика Стишова С.М. [2] – для пространства с минимально необходимой удельной энтропией $R \ln 2$, характерной для двухуровневой системы [его график].

7) Поэтому после плавления было естественным наблюдать увеличение в несколько раз параметров P_{amp} такое, чтобы в жидкости вращательные движения в полной мере соответствовали поступательным. При этом параметр P_{lin} значительно уменьшался, поскольку свой обмен энергией (или квантами действия) электроны в атомах теперь осуществляют уже с двумя подсистемами: фононами и условно ротонами в жидкости [графики для P_{amp} и P_{lin}].

8) Неожиданным оказалось изменение зависимости P_{amp} и P_{lin} от порядкового номера элемента из-за того, что в жидком состоянии стала допустимой упаковка атомов с осями симметрии 5-го и 7-го порядков [изменение на графиках знака корреляции для P_{amp} и P_{lin} после плавления].

9) Обсуждается причина как обычного уменьшения, так и редкого аномального увеличения плотности элемента сразу после плавления, связанная с вынужденным и не всегда эффективным его тепловым расширением в твёрдом состоянии [данные из работ Станкуса С.В.].

10) Если переход из жидкого состояния в твёрдое определялся в основном возбуждениями электронов через параметр P_{lin} и масштабный параметр T_{exp} , то на переход жидкости в состояние пара сильное влияние оказывает параметр P_{amp} , определённый ранее для твёрдого состояния [комплекс $P_{amp} \cdot (T_{melt}$ или $\cdot T_{boil})$].

11) Показывается, что сильное влияние на величину температуры испарения T_{boil} оказывает число электронов на внешней оболочке и соответствующий им орбитальный момент [два графика с $(T_{melt}$ и $T_{boil})$].

12) А также то состояние, в котором находятся электроны в атоме как единая система: вырожденном или нет [щелочные металлы; p -элементы с одним или двумя внешними электронами; элементы **Au-Hg-Tl** после заполненной в них f -оболочки редких земель].

Таким образом, в этом докладе более детально обосновывается сделанный ранее вывод о том, что **жидкое состояние является продолжением твёрдого**, а также приводятся новые результаты, связанные с переходом жидкости в состояние газа (пара).

Список литературы:

1. Дулин М.Н. Обнаружение фермионных возбуждений электронов в атомах при тепловом расширении твёрдых тел // Тезисы. XXXVIII Сибирский теплофизический семинар. 2022. с.79.
2. Стишов С.М. Термодинамика плавления простых веществ. // УФН. 1974. т.114. в.1. с.3.

УДК 53.082.64

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ВОЛЬФРАМА В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ 800 К ДО 2800 К

Захаров Ю.А., Гоц С.С., Бахтизин Р.З., Шарипов Т.И.

Уфимский университет науки и технологий, 450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

При исследовании деградационных процессов и низкочастотных флуктуаций тока в нитях накала [1] требуется непрерывный контроль температуры объекта исследования во время проведения измерения. Для подобных целей может использоваться метод термосопротивления [2-4]. В работе [5] описан метод термосопротивления, использующий начальную температуру нити. К недостаткам указанного метода относятся: необходимость измерения начальной температуры внутри колбы; необходимость экстраполяции зависимости сопротивления нити от напряжения; нелинейность указанной зависимости при комнатных температурах; большая неопределённость поправки для температурного коэффициента сопротивления. В связи с этим в данной работе рассмотрен метод термосопротивления, использующий температуру появления видимого излучения [6].

Объектами исследования являлись нити накала газонаполненных ламп. Предметом исследования являлась зависимость среднеобъёмной температуры нити накала от напряжения накала. Среднеобъёмная температура нагрева нитей накала определялась с помощью метода термосопротивления [6] по формуле

$$T = T_1 + \frac{R - R_1}{\alpha_1 R_1} = T_1 + \frac{R - R_1}{R_1} \left(\frac{1}{\alpha_0} + T_1 - T_0 \right),$$

где α_0 – температурный коэффициент сопротивления, соответствующий температуре $T_0=273,15$ К, α_1 – температурный коэффициент сопротивления, соответствующий температуре появления видимого свечения нити накала $T_1=800$ К, R_1 – сопротивление нити накала при температуре появления видимого излучения, R – сопротивление нити накала. В

В данной работе сравнивались значения температуры, рассчитанные двумя вариантами метода термосопротивления [5-6].

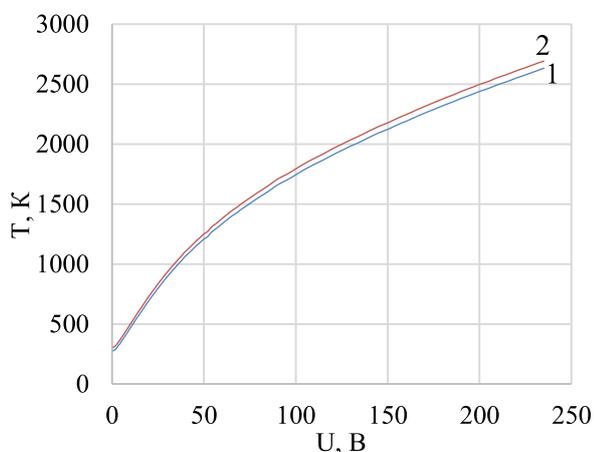


Рис. 1. Зависимость среднеобъёмной температуры нити накала от напряжения накала для 25 Вт лампы

На рисунках 1 и 2 показаны полученные зависимости температуры от напряжения и тока соответственно. Кривым № 1 на рисунках соответствует температура, рассчитанная методом [6], а кривым № 2 – температура, рассчитанная методом [5].

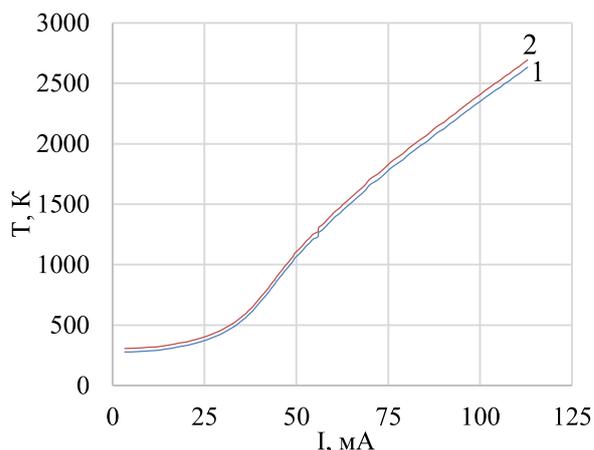


Рис. 2. Зависимость среднеобъёмной температуры нити накала от тока для 25 Вт лампы.

Относительное отклонение указанных температур друг от друга менялось от 2,5 % при температурах около 300 К и 1,1 % при температурах около 800 К до 0,57 % при более высоких температурах.

На основе проведённых исследований установлено, что при использовании метода [5] рассчитанное с помощью экстраполяции сопротивление нити при нулевом напряжении накала получилось заниженным.

Список литературы:

1. Захаров Ю.А., Гоц С.С., Бахтизин Р.З., Шарипов Т.И. Экспериментальное исследование динамики деградационных процессов в вольфрамовых нитях накала // Всероссийская конференция «XXXVIII Сибирский теплофизический семинар»: сборник трудов. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН. 2022. С. 116-119.
2. Способ контроля температуры проводов линий электропередачи // Патент России № 2547837. 2015. Бюл. № 10. / Мустафин Р.Г., Мохаммед К.С.А.
3. Способ косвенного контроля температуры провода воздушной линии электропередачи // Патент России № 2157040. 2000. Бюл. № 27. / Дьяков А.Ф., Левченко И.И., Засыпкин А.С., Аллилуев А.А., Сацук Е.И.
4. Способ определения температуры аморфных ферромагнитных микропроводов при токовом нагреве // Патент России № 2696826. 2019. Бюл. № 22. / Одинцов В.И., Гудошников С.А., Любимов Б.Я., Меньшов С.А.
5. Захаров Ю.А., Гоц С.С., Бахтизин Р.З. Метрологические аспекты измерения среднеобъёмной температуры вольфрамовых нитей накала газонаполненных осветительных ламп // Измерительная техника. 2019. №. 4. С. 51 – 56.
6. Способ измерения температуры нагрева нитей накала осветительных ламп // Патент России № 2765887. 2022. Бюл. № 4. / Захаров Ю.А., Гоц С.С., Бахтизин Р.З., Шарипов Т.И.

УДК 536.46

СИНТЕЗ КОМПОЗИТА В УСЛОВИЯХ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА

Князева А.Г.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4

При синтезе слоевых композитов, соединении материалов, нанесении многослойных покрытий возникает необходимость анализа состава ожидаемого продукта и динамики процесса со всевозможными сопутствующими явлениями. Это относится и к созданию композитов в технологии LOM, когда конечные свойства композита зависят от физико-химических превращений в одном из материалов – слое клея или в соединительном составе (см. рис.1). На результат оказывают влияние условия сопряженного теплообмена, температура и скорость движения ролла, а также давление его прижатия, определяющее площадь пятна контакта.

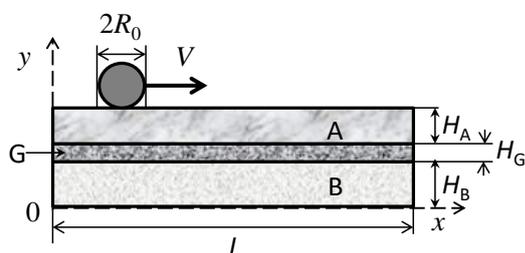


Рис.1. Иллюстрация к постановке задачи. А и В – инертные материалы; G – реагент, соединительный состав или слой клея. V – скорость движения ролла.

При формулировке частных вариантов задачи синтеза слоевого композита рассматриваются разные ситуации. В [1,2] предполагается, что весь комплекс химических реакций в слое G может быть описан суммарной схемой «реагент – продукт реакции». Показано, что в зависимости от соотношения характерных масштабов можно выделить разные режимы – управляемый режим и режим самостоятельного распространения фронта реакции. В [2] о возможности выхода на квазистационарный режим предлагается судить по поведению интегрального производства энтропии вследствие необратимых процессов в слое G. Показано, что для этой цели не годится ни одна из популярных термодинамических характеристик (запас тепла в прогретом слое, избыток энтальпии, поток тепла из зоны реакции и др.). В [3] предполагается, что в слое клея возможна структуризация - обратимый процесс, скорости прямой и обратной стадий которого зависят как от температуры, так и от работы напряжений. Это приводит к неполноте структуризации к моменту окончания движения ролла и к необходимости подбора технологических условий для получения заданной структуры адгезионного слоя. Для условия, когда в промежуточном слое формируется композит типа «матрица-включение», в [4] предложен вариант модели с двумя последовательно-параллельными стадиями. Первая стадия приводит к формированию частиц и промежуточного продукта. Вторая дает матрицу некоторого

сложного состава. Соотношение между скоростями суммарных реакций зависит от исходного состава смеси. Для образца конечных размеров о режимах и полноте превращения в промежуточном слое предложено судить по среднеинтегральной степени превращения. Зоной реакции в этом случае может быть охвачен весь реагент. Показано, что зависимость времени полупревращения от параметров модели не противоречит представлениям химической кинетики и вполне может служить критерием протекания реакции в сопряженных условиях теплообмена.

Если во всех названных ситуациях предполагалось, что давление прижатия ролла сводится к изменению площади пятна контакта с верхним слоем, а действующим напряжением в слое клея служит давление прижатия, то продолжение исследований связано с явным учетом напряженно-деформированного образца. При условии, что суммарная толщина слоев $H_A + H_G + H_B$ много меньше его длины L , задачу о равновесии можно свести к квазидвумерной задаче теории пластин с распределенной подвижной внешней нагрузкой и изменяющимся температурным полем. Поскольку изменение температуры приводит к изменению состава, то причиной напряжений и прогибов оказываются не только термические, но и химические напряжения, неоднородные по образцу.

В простейшем приближении пластины Кирхгофа приходим к уравнению для прогибов, содержащее эффективную жесткость слоевого композита

$$D = \frac{E_{eff}}{1 - \nu_{eff}^2} \frac{(H_A + H_B + H_G)^3}{12}$$

Изгибающие моменты содержат термические и химические составляющие. При более строгом подходе можно использовать известные теории многослойных пластин.

Список литературы:

1. Knyazeva A. Model of chemical conversion initiation in the adhesive bonding layer during roll motion in the process of laminated object creation // Nanoscience and Technology: An International Journal. 2018. V. 9. P. 77-89
2. Knyazeva A., Travitzky N. Modes of adhesive bonding layer formation during roll motion in the process of laminated object creation // HighTempMatProc, 2023. V. 27. № 1 P.67-96
3. Сайфуллин Э.Р., Князева А.Г. Влияние условий нагружения на процессы структуризации в адгезионном слое при создании многослойных объектов // ВМСС. 2022. Т. 15, № 1. С. 5-18
4. Сайфуллин Э. Р., Князева А. Г. Численное исследование двухстадийного процесса синтеза композита, управляемого подвижным источником, в условиях сопряженного теплообмена // Химическая физика и мезоскопия. 2021. Т. 23, № 2, С.127-144.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0003

УДК 538.953; 544.72

МОЛЯРНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ И ТОЛЩИНА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ

Кутуев Р.А.^{1,2}

¹Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова

364024, Россия, Грозный, ул. А. Шерипова, 32

²Комплексный НИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН

364051, Россия, Грозный, В. Алиева 21 а

В работе получены формулы и подробно описана методика проведения расчетов поверхностных свойств трехкомпонентных систем по концентрационной зависимости поверхностного натяжения. По разработанному методу, используя экспериментальные данные по ПН и плотности, определены изотермы молярной поверхности, толщины и состава ПС расплавов индий-олово-свинец.

А. И. Русановым получено уравнение, которое связывает молярные доли компонентов в поверхностном слое с поверхностным натяжением раствора. Вычисления поверхностных свойств бинарных расплавов по этому уравнению не встречает трудностей, так как в этом случае это уравнение содержит только одно неизвестное. Увеличение числа компонентов в расплаве приводит к росту числа неизвестных и для решение этого уравнения относительно неизвестных значений молярных долей компонентов в ПС необходимы дополнительные уравнения.

С другой стороны, полученные уравнения содержат молярную поверхность, зависимость которой от состава неизвестна.

Нами, исходя из выражения Дж. Батлера, получено следующее выражение для молярной поверхности:

$$\omega = \frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^3 \left(\sigma_i \omega_i + RT \ln \frac{a_i^\omega}{a_i} \right) x_i^\omega, \quad (1)$$

где σ_i и ω_i – ПН и парциально-молярные поверхности i -го компонента, a_i^ω и a_i термодинамические активности компонентов в ПС и объемной фазе, соответственно.

Выражение (1) служит дополнительным уравнением, которое с учетом конкретного способа изменения состава, позволяет получить необходимые системы уравнений.

Действительно, при изменении состава по сечениям $F_m = K_{ij} = x_i/x_j = const$ имеем систему линейных уравнений:

$$\frac{1}{x_1} \left(\frac{d \ln \sigma}{d \ln x_1} \right)_{K12} \sum_{i=1}^3 \left(\sigma_i \omega_i + RT \ln \frac{a_i^\omega}{a_i} \right) x_i^\omega = -[(x_1 - x_1^\omega)g_{11} + (x_2 - x_2^\omega)g_{12}] + [(x_1 - x_1^\omega)g_{12} + (x_2 - x_2^\omega)g_{22}] (X_3/X_2 + 1)$$

$$\frac{1}{x_3} \left(\frac{d \ln \sigma}{d \ln x_3} \right)_{K12} \sum_{i=1}^3 \left(\sigma_i \omega_i + RT \ln \frac{a_i^\omega}{a_i} \right) x_i^\omega = -[(x_1 - x_1^\omega)g_{11} - (x_2 - x_2^\omega)g_{22}]x_1/x_2 - (x_1 - x_1^\omega)g_{12} - (x_2 - x_2^\omega)g_{22} \quad (2)$$

По полученным уравнениям нами проведены расчеты свойств поверхностного слоя тройной системы In-Sn-Pb, зависимость поверхностного натяжения которой определена экспериментально.

Результаты расчетов показали, что изотермы адсорбции свинца по разрезам ($X_{in} : X_{Sn} = const$) близки к концентрационной зависимости его адсорбции в боковых двойных системах In-Pb и Sn-Pb. Более сложными оказались изотермы адсорбции олова по разрезам $X_{in} : X_{Sn} = const$. Согласно полученным результатам в исследуемой системе наблюдается явление подавления адсорбции (олова) – адсорбцией более поверхностно активного свинца.

Толщина поверхностного слоя расплавов In-Sn-Pb с повышением содержания Pb увеличивается (см. рис. 1).

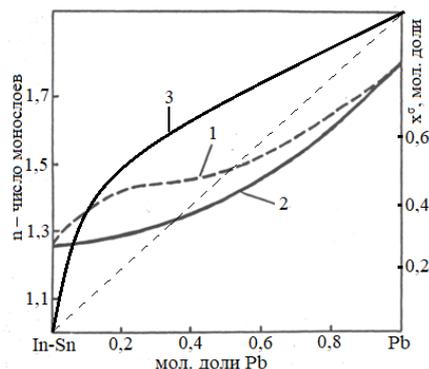


Рис. 1. Состав и толщина поверхностного слоя расплавов индий-олово-свинец при 623 К: 1, 2 – зависимость толщины от молярных долей свинца в объеме и в поверхностном слое; 3 – молярные доли свинца в ПС.

При этом в интервале концентрации от 0,4 до 0,45 молярных долей свинца на изотермах толщины ПС наблюдается точка перегиба. Изотермы молярных долей свинца в поверхностном слое занимают промежуточное положение между его изотермами в боковых двойных системах индий-свинец и олово-свинец.

УДК 621.793.74:621.365.5

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ С ОПЛАВЛЕНИЕМ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ С УЧЕТОМ ДВУХ ТОЧЕК КЮРИ

Лепешкин А.Р.^{1,2}, Кондрашов С.С.¹, Федин М.А.¹, Кувалдин А.Б.¹, Федина С.А.¹.

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

² Московский авиационный институт «НИИУ»,
125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 4

Проблема защиты металлов от коррозионных процессов не теряет своей актуальности. Темпы развития многих отраслей промышленности тормозятся из-за нерешенных вопросов по борьбе с коррозией. Это ставляет осуществлять поиск технологий, которые позволили бы обеспечить существенное повышение ресурса работоспособности металлических деталей в агрессивных средах. Нанесение на поверхность металла покрытий, улучшающих их эксплуатационные характеристики – один из наиболее перспективных и эффективных способов борьбы с коррозией.

Сегодня для предотвращения воздействия коррозии на металлические конструкции и эффективного продления срока службы изделия применяют такие технологии, как электролитическое осаждение, гуммирование, покраска, газотермическое напыление и др. Анализ показывает, что одним из самых простых в реализации, эффективных и экономичных способов является газопламенное порошковое напыление [1].

Покрытие, полученное в результате напыления, по своей структуре является в значительной степени пористым. В некоторых случаях это свойство можно использовать, но чаще требуются плотные покрытия с низким содержанием пор, в том числе для упрочнения детали и повышения износостойкости [1-3]. Существенным недостатком газопламенных покрытий также является их относительно невысокая адгезионная прочность. Эффективное влияние на эти факторы оказывает последующее дополнительное высокоэнергетическое воздействие концентрированным источником энергии на напыленные покрытия для улучшения их качественных показателей.

В данной работе проведенный сравнительный анализ позволил установить, что в условиях комбинированной обработки наиболее предпочтительным способом температурного воздействия на напыленные защитные покрытия является индукционный нагрев токами средней и высокой частоты [3]. Он имеет характерное преимущество: оплавление происходит непосредственно в узкой зоне сцепления поверхности с покрытием без нагрева самого изделия.

Предложенная авторами технология нанесения защитного коррозионностойкого покрытия разделяется на два этапа: напыление порошка при помощи специальной газопламенной горелки и последующее его расплавление для фиксации на вращающейся детали с помощью индукционного нагрева и центробежных сил.

В НИУ «МЭИ» на кафедре ЭППЭ создана новая индукционная установка с разными типами электродвигателей, один из которых перемещает индуктор, а

второй вращает изделие с нанесенным покрытием. Осуществлены синтез системы управления и программирование контроллеров плат управления электроприводами. Используемые решения позволяют повысить точность управления технологическим процессом, уменьшить размеры и снизить стоимость установки. В состав установки входят: индуктор, гибкий токоподвод, источник питания, подставка с закрепленным индуктором, обрабатываемая деталь с покрытием, асинхронный электродвигатель (электропривод), шаговый электродвигатель, механический преобразователь, шкаф управления.

В проведенных исследованиях использовались цилиндрические заготовки различных размеров из стали 45 с напыленным газопламенной горелкой коррозионностойким покрытием Castolin Eutalloy RW 12496.

Разработана технология оплавления напыленного коррозионно-стойкого покрытия толщиной 1 мм при индукционном нагреве стальной цилиндрической заготовки с указанным покрытием на частоте вращения 400 об/мин. Выбраны частота тока (66 кГц) и другие параметры индукционной установки повышенной частоты для обеспечения максимального тепловыделения в коррозионностойком покрытии при его оплавлении на поверхности стальной цилиндрической заготовки. С использованием пакета программ COMSOL Multiphysics проведены трехмерные расчеты и исследования поверхностных распределений плотности тока и температуры по длине заготовки при индукционном нагреве.

Выполнены расчетные и экспериментальные исследования индукционного нагрева, теплового и термонапряженного состояния стальной заготовки с покрытием. Проведено сравнение расчетной и экспериментальной кривых нагрева поверхности стальной заготовки с покрытием с учетом двух точек Кюри. Анализ результатов показывает, что термонапряжения, возникающие в заготовке, не влияют на технологический процесс индукционного нагрева заготовки с оплавлением покрытия.

Список литературы:

1. Газотермическое напыление: учебное пособие / Под ред. Балдаева Л.Х. М.: Маркет ДС. 2007. 344 с.
2. Simulation of thermal state of parts with ceramic coatings in a high frequency electromagnetic field / A.R. Lepeshkin, A.B. Kuvadin, O.I. Plyinskaya, M.A. Fedin, A.O. Kuleshov // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V.85. No.12. pp.1507-1509.
3. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях: монография / Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. М.: ИНФРА-М. 2019. 273с.

УДК 536.2:537.533.2

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХЛепешкин А.Р.^{1,2}¹Московский авиационный институт «НИИУ»,
125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 4²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

В данной работе предложены методики исследований теплопроводности, электронной эмиссии образцов деталей и нестационарного теплового состояния деталей при воздействия высокочастотных (ВЧ) ультразвуковых механических колебаний. В работе [1] был обнаружен электрический сигнал (переменная ЭДС) в полупроводниковом материале (германии) при воздействии ультразвуковых (УЗ) колебаний (волн). Это одно из проявлений акустоэлектронного взаимодействия. Появление тока или ЭДС связано с передачей импульса (и соответственно энергии) от УЗ волн (от фононов) к электронам проводимости. Это приводит к направленному движению носителей (увеличению скорости дрейфа электронов) - электрическому току в направлении распространения звука. В данной работе зарегистрированы электрические сигналы (переменные ЭДС, возникающие при действии УЗ колебаний (волн) на перемещение свободных электронов) в металлических образцах и деталях из разных сплавов при воздействии ВЧ механических колебаний. Указанные факторы влияют на теплопроводность и эмиссию электронов. Ранее проводилось исследование влияния низкочастотных механических колебаний на теплопроводность проводников из никелевого сплава [2]. Известно несколько эмиссионных физических явлений, заключающихся в испускании электронов телами под воздействием различных внутренних и внешних факторов: термоэмиссионная, фотоэлектронная, вторичная электронная, автоэлектронная, взрывная электронная эмиссии [3-5]. В данной работе обнаружен и исследован новый вид электронной эмиссии деталей при воздействии механических колебаний. Предложен метод нестационарного определения температуропроводности материалов в поле действия ультразвуковых ВЧ механических колебаний. С его помощью проведены исследования. Разработано устройство для определения указанных характеристик, которое представляет собой конструкцию с ультразвуковым преобразователем и образцом (моделью лопатки турбины) в виде стержня (волновода) с электронагревателем. Внутри средней части корпуса устройства расположен магнитоотрицательный преобразователь, работающий на частоте 20 кГц с интенсивностью 50 Вт и на конце конструкции - стержень.

Методика исследований предусматривала закрепление на середине стержня переменного сечения (в виде конуса) электронагревателя с теплоизоляцией, состоящего из нескольких витков хромелевого провода. Кончик стержня выполнен в виде плоской расширяющейся части. В точке кончика стержня исследовалась температура и передача тепла от электронагревателя. Для исследования теплового состояния конусного стержня и бесконтактных измерений температуры его поверхности использовался термограф Flir.

На этом же устройстве, работающем на частоте 20кГц, проведены исследования эмиссии электронов, которая возникала также под воздействием высокочастотных механических колебаний. Для этого на конце кончика стержня была установлена первая медная пластина (эмиттер) и параллельно ей вторая медная пластина (коллектор). Воздушный зазор между пластинами изменялся при исследованиях. Для измерения ЭДС и тока электронной эмиссии вторая пластина через соединительный кабель подключалась к чувствительному анализатору сигналов и спектра МС-200.

С использованием разработанных методов проводились исследования нестационарного теплового состояния, теплопроводности и электронной эмиссии стержней с применением термографа при воздействии высокочастотных механических колебаний. По результатам указанных исследований было получено, что температуропроводность металлического стержня из углеродистой стали с учетом влияния высокочастотных механических колебаний, увеличивается на 50%. Эмиссия электронов исследовалась на устройстве со стержнем и пластинами (между которыми изменялся зазор) с использованием чувствительного анализатора спектра. При воздействии эмиссии электронов температура кончика стержня снижалась на 20÷30 °С. По результатам исследований были определены характеристики теплопроводности и электронной эмиссии в зависимости от зазора. Полученные результаты имеют актуальное значение для учета изменения теплопроводности деталей и эмиссии свободных электронов (переносящих порции тепла) с вращающихся рабочих лопаток турбин двигателей и других турбомашин при воздействии механических колебаний для более точного расчета теплового состояния лопаток турбин в условиях эксплуатации.

Список литературы:

1. Weinreich G., White H.G. Observation of the Acoustoelectric Effect // *Phys. Rev.* 1957. No. 106. pp. 1104-1106.
2. Лепешкин А.Р. Метод исследования распространения тепла и температуропроводности металлов в поле действия виброускорений // *Сб. тез. Докл. СТС-XXXI.* 2014 г. Новосибирск. С.205.
3. Спроул Р. Современная физика. М: Наука, 1974. 592 с.
4. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. Радио. 1974. 256 с.
5. Автоэлектронная эмиссия / Шредник В.Н. Физическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. 1988. Т.1. С.21.

УДК 536.6

**МОНОКРИСТАЛЛЫ ДИМОЛИБДАТОВ И ДИВОЛЬФРАМАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ:
РОСТ КРИСТАЛЛОВ, ЭНТАЛЬПИИ, ТЕПЛОЕМКОСТЬ****Мацкевич Н.И.¹, Семерикова А.Н.¹, Самошкин Д.А.^{1,2}, Станкус С.В.², Григорьева В.Д.¹, Трифонов В.А.¹,
Кочелаков Д.В.¹, Лукьянова С.А.¹, Шлегель В.Н.¹, Кузнецов В.А.¹**¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Монокристаллы молибдатов и вольфраматов щелочных металлов являются перспективными материалами для физики высоких энергий, оптоэлектроники, различных сенсоров и др. [1-2]. Одними из перспективных монокристаллов для этих применений являются димоллибдаты и дивольфраматы натрия, лития, цезия.

В настоящей работе выращены монокристаллы $\text{Cs}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{W}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ с использованием низко-градиентного метода Чохральского, описанного в работе [3]. Термодинамические свойства выше упомянутых монокристаллов (стандартные энтальпии образования, энтальпии решеток, энергии стабилизации, теплоемкость) определены методом реакционной калориметрии и дифференциально-сканирующей калориметрии.

В качестве прекурсоров для выращивания монокристаллов использовались глубоко очищенные MoO_3 , WO_3 , Cs_2CO_3 (99.99%) и Na_2CO_3 (99.99%). Монокристаллы выращивали в платиновых тиглях в трехзонной печи сопротивления. Температура каждой зоны контролировалась отдельно. Градиент температуры в печи не превышал 1 К/см. Перед проведением роста монокристаллов выполняли твердофазный синтез в том же платиновом тигле, после чего печь нагревали на 5-10 К выше температуры плавления и выдерживали при этой температуре несколько часов до гомогенизации расплава.

Идентификацию монокристаллов проводили рентгенофазовым и рентгеноструктурным анализами. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометрах Shimadzu XRD-7000 ($\text{CuK}\alpha$ - излучение), Bruker D8 ADVANCE ($\text{CuK}\alpha$ - излучение). Рентгеноструктурный анализ выполнен на монокристалльном дифрактометре Bruker D8 Venture ($\text{MoK}\alpha$ - излучение). Результаты анализов показали, что монокристаллы являются индивидуальными фазами.

Для определения стандартной энтальпии образования, а далее расчета энтальпии решетки и энергии стабилизации использовался метод растворной калориметрии [1-2]. Термохимический цикл был построен таким образом, что энтальпии растворения монокристаллов в растворах КОН для $\text{Cs}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ и NaOH для $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ и $\text{Na}_2\text{W}_2\text{O}_7$ сравнивались с энтальпиями

растворения оксида молибдена, вольфрамовой кислоты и карбоната натрия. На основе полученных экспериментальных и литературных данных были рассчитаны стандартные энтальпии образования монокристаллов $\text{Cs}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{W}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$. Далее с использованием цикла Борна-Габера были рассчитаны энтальпии решеток.

Рассчитанные энтальпии решеток для $\text{Cs}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{W}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ составляли: $\Delta_{\text{lat}}H^0(\text{Na}_2\text{W}_2\text{O}_7) = -49030$ кДж/моль; $\Delta_{\text{lat}}H^0(\text{Cs}_2\text{Mo}_2\text{O}_7) = -54480$ кДж/моль; $\Delta_{\text{lat}}H^0(\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7) = -54730$ кДж/моль. Как можно видеть, с термодинамической точки зрения наиболее перспективным является димоллибдат натрия.

Для определения теплоемкости был использован метод дифференциально-сканирующей калориметрии [2]. Измерения проводились в температурном интервале 320-700...1000 К на калориметре DSC 404 F1 с использованием платиновых тиглей с корундовыми вкладышами и платиновых крышек со скоростью нагрева 6 К/мин в проточной атмосфере аргона (20 мл/мин). В качестве калибровочного образца использовался сапфир.

На кривой теплоемкости $\text{Cs}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ обнаружено два фазовых перехода. Первый фазовый переход наблюдался при температуре 405 К, а второй фазовый переход – при температуре 658 К. Рассчитанные энтальпии фазовых переходов составляли 0.222 кДж/моль и 1.640 кДж/моль соответственно.

Список литературы:

1. Matskevich N.I., Shlegel V.N., Sednev A.L., Semerikova A.N., Zaitsev V.P., Kuznetsov V.A., Novikov A.Yu., Zuev A.Yu. Thermodynamic characteristics of Li_2MoO_4 , $\text{Li}_2\text{W}_{0.85}\text{Mo}_{0.15}\text{O}_4$ single crystals and stability direction for alkali molybdates // J. Chem. Thermodyn. 2020. V. 145. 106059.
2. Tkachev E.N., Matskevich N.I., Samoshkin D.A., Shlegel V.N., Stankus S.V. Heat capacity of lithium tungsten oxide doped by molybdenum ($\text{Li}_2\text{W}_{0.9}\text{Mo}_{0.1}\text{O}_4$) in the temperature range 319-910 K by DSC // Phys. B: Cond. Matter. 2021. V. 612. 412880.
3. Vasiliev Y.V., Borovlev Y.A., Grigoriev D.N., Shlegel V.N. BGO crystal grown by a low thermal gradient Czochralski technique // J. Cryst. Growth. 2001. V. 229. P. 305-311.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 19-19-00095-П)*

УДК 536.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОБАЛЬТИТА ВИСМУТА, ЗАМЕЩЕННОГО ДИСПРОЗИЕМ

Мацкевич Н.И.¹, Семерикова А.Н.¹, Самошкин Д.А.^{1,2}, Станкус С.В.², Ткачев Е.Н.¹, Зайцев В.П.^{1,3}, Новиков А.Ю.¹, Федоров А.А.¹

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

³ Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

Дельта форма оксида висмута ($\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$) обладает наиболее высокой ионной проводимостью среди твердотельных оксидов [1-2]. Поэтому соединения на основе дельты формы оксида висмута являются перспективными ионными проводниками, применяемыми в топливных элементах, керамических кислородных генераторах, электрокатализе, различных сенсорах и др. Однако область стабильности дельта формы оксида висмута ограничена. Для того чтобы расширить область стабильности, используют замену висмута различными элементами III-VII групп, в частности, редкоземельными элементами (РЗЭ). Одним из перспективных способов расширить область стабильности дельта формы оксида висмута является содопирование, то есть замена двумя и более элементами. Содопирование в ряде случаев позволяет увеличить устойчивость и ионную проводимость соединений.

В настоящей работе методом твердофазных реакций [2] синтезирован новый кобальтит с высоким содержанием висмута, замещенный диспрозиом. Термодинамические свойства полученного соединения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.3}$ были измерены двумя методами: методом калориметрии растворения при комнатных температурах и методом дифференциально-сканирующей калориметрии в интервале температур 320-1000 К. Были определены стандартные энтальпии образования, энтальпии решетки и теплоемкость.

В качестве прекурсоров для синтеза были использованы высокочистые Bi_2O_3 (99.999%), Co_3O_4 (99.99%), Dy_2O_3 (99.99%). Исходные соединения перемешивались в планетарной мельнице FRITSCHE pulverisette 6, спрессовывались в таблетки с помощью прессы ПГР-400 и отжигались в печи СНОЛ 4/1200 при температуре 1000 К в течение 70 ч.

Идентификацию соединения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.3}$ проводили рентгенофазовым анализом на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 ($\text{CuK}\alpha$ - излучение). Результаты анализа показали, что соединение $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.3}$ является индивидуальной фазой, структура кубическая, пространственная группа Fm-3m.

Для определения стандартной энтальпии образования использовался метод реакционной калориметрии

[2]. Термохимический цикл был построен таким образом, что энтальпия растворения соединения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.3}$ в 1 М соляной кислоте сравнивалась с энтальпиями растворения оксида висмута, хлорида кобальта и оксида диспрозия.

На основе полученных экспериментальных и литературных данных была рассчитана стандартная энтальпия образования соединения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.3}$. Далее с использованием цикла Борна-Габеры была рассчитана энтальпия решетки. Полученная энтальпия решетки соединения сравнивалась с энтальпиями решетки ранее исследованных нами соединений $\text{Bi}_{12.5}\text{R}_{1.5}\text{CoO}_{22.3}$ (R = РЗЭ). Показано, что с уменьшением радиуса редкоземельного элемента энтальпия решетки увеличивается. Это можно объяснить выведенной авторами формулой, связывающей энтальпию решетки и радиус редкоземельного элемента.

Для определения теплоемкости был использован метод дифференциально-сканирующей калориметрии [3]. Измерения проводились в температурном интервале 320-1000 К на калориметре DSC 404 F1 с использованием платиновых тиглей с корундовыми вкладышами и платиновых крышек со скоростью нагрева 6 К/мин в проточной атмосфере аргона. В качестве калибровочного образца использовался сапфир.

Список литературы:

1. Punn R., Feteira A.M., Sinclair D.C., Greaves C. Enhanced oxide ion conductivity in stabilized $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ // J. Am. Chem. Soc. 2006. V. 128. P. 15386-15387.
2. Matskevich N.I., Wolf Th., Greaves C., Bryzgalova A.N. Preparation, ionic conductivity and thermochemistry of new $\text{Bi}_{12.5}\text{Lu}_{1.5}\text{ReO}_{24.5}$ phase // J. Alloys Compd. 2014. V. 582. P. 253-256.
3. Matskevich N.I., Stankus S.V., Samoshkin D.A., Zaitsev V.P., Tkachev E.N. Heat capacity and phase transition of bismuth niobate doped by rare earth elements // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1677. P. 012169.

Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00095-П)

УДК 536.423

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКИХ СМЕСЕЙ. РОЛЬ РАССЕЙЯНИЯ ФОНОНОВ НА ПРИМЕСЯХ

Мелких А.В.¹, Скрипов П.В.²

¹Уральский Федеральный университет им. Б.Н. Ельцина,
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

²Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Цель нашего исследования состояла в разработке модели теплопроводности, учитывающей микроскопические механизмы переноса тепла в растворах, и ее аттестация на изученных ранее объектах. Мотивацией послужили данные о появлении дополнительного теплового сопротивления в жидкости при добавлении в неё второго компонента. Ранее было предположено [1, 2], что наличие флуктуаций концентрации или плотности может быть источником дополнительного теплового сопротивления, в частности, вследствие рассеяния фононов на неоднородностях.

При рассмотрении обобщенной проводимости (в том числе, теплопроводности) предложена формула для коэффициента теплопроводности последовательного соединения «нитей» [3]:

$$\kappa = \frac{\kappa_1 \kappa_2}{x_1 \kappa_2 + (1 - x_1) \kappa_1}$$

κ_1 , κ_2 , теплопроводности компонентов смеси, x_1 – доля первого компонента в смеси.

Учен эффект рассеяния фононов на примесях (молекулах второго компонента). Суть эффекта состоит в том, что примесь можно рассматривать как другую фазу, на границе которой происходит рассеяние фононов. С учетом рассеяния фононов на примесях получено выражение для коэффициента теплопроводности в виде:

$$\kappa = \frac{\kappa_{10} [x_1 + (1 - x_1) \gamma] \kappa_{20} [(1 - x_1) + x_1 \gamma]}{x_1 \kappa_{20} [(1 - x_1) + x_1 \gamma] + (1 - x_1) \kappa_{10} [x_1 + (1 - x_1) \gamma]},$$

$$\gamma = \left\{ 1 - \left(\frac{\sqrt{\frac{m_2}{m_1}} - 1}{\sqrt{\frac{m_2}{m_1}} + 1} \right)^2 \right\}$$

где m_1 , m_2 – массы молекул компонентов, κ_{10} , κ_{20} – теплопроводности чистых компонентов.

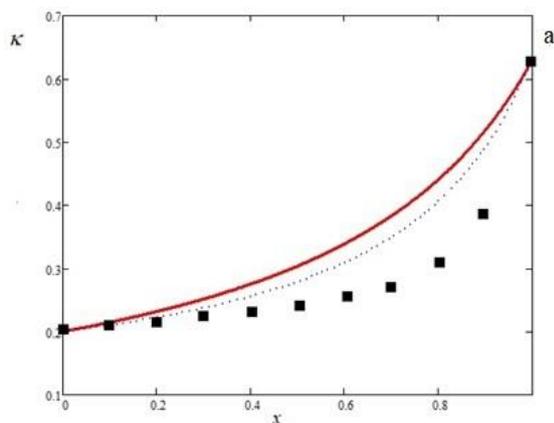


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности водного раствора диэтиленгликоля от массовой доли воды.

На рисунке 1 изображена зависимость коэффициента теплопроводности водного раствора диэтиленгликоля от массовой доли воды при температуре $T = 304$ К и давлении $p = 0.1$ МПа.

Жирная линия соответствует зависимости коэффициента теплопроводности κ от доли воды x без учета рассеяния на фононах, а точечная – зависимости с учетом рассеяния на фононах. Точки соответствуют экспериментальным данным. Из рисунка видно, качественное согласие теории и эксперимента.

В рамках построенной модели показано, что коэффициент теплопроводности смеси не является аддитивной величиной. Приведены аргументы в пользу того, что теплопроводность смеси логично рассматривать в виде последовательного соединения сопротивлений, моделирующих теплопроводность компонентов (модель типа «нити»).

Модель также предлагает объяснение взаимосвязи дополнительного теплового сопротивления с избыточным объемом смеси, представленной в [4].

Для прямого обнаружения эффекта рассеяния фононов на компонентах смеси необходимы специальные эксперименты. Интересно исследовать зависимость дополнительного теплового сопротивления от других параметров смеси, таких, как среднее расстояние между молекулами и сила связи. Для этого можно использовать смесь с компонентами, массы которых близки, а упомянутые выше параметры существенно различаются.

Список литературы:

1. Филиппов Л.П., Кравчун С.Н. О теплопроводности растворов жидкостей // Ж. Физ. Хим. 1982. Т. 56. № 11. С. 2753–2756.
2. Кравчун С.Н. Теплопроводность бинарных жидких систем // Ж. Физ. Хим. 1986. Т. 60. № 9. С. 2176–2179.
3. Melkikh, A.V., Skripov, P.V. Thermal Conductivity of Liquid Mixtures: Concentration Dependence Model // Int. J. Thermophys. 2023. V. 44. 23. <https://doi.org/10.1007/s10765-022-03125-7>
4. Povolotskiy I.I., Volosnikov D.V., Skripov P.V. Heat Conduction of Superheated Mixtures: Relationship with Excess Volume. J. Engin. Thermophys. 2022. М. 31. P. 19–31. <https://doi.org/10.1134/S1810232822010039>

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00115, <https://rscf.ru/project/19-19-00115/>

УДК 536.242

ТЕПЛОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ТЕПЛОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАСТВОРОВ ГЛИКОЛЬ-ВОДА И ГЛИКОЛЬ-ГЛИКОЛЬ

Поволоцкий И.И., Волосников Д.В., Скрипов П.В.

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Одними из важных крупнотоннажных продуктов органического синтеза являются гликоли, которые в свою очередь являются исходным сырьем в производстве многих технологических жидкостей, в частности, различных теплоносителей [1]. Применять в качестве теплоносителя воду не всегда представляется возможным. Вода обладает определенными преимуществами: дешевизна, высокие теплопроводность и текучесть, но свойство расширяться при замерзании, и температура кристаллизации около 0°C делают ее использование неуместным для дорогостоящего климатического и отопительного оборудования [1, 2]. Теплоносители на основе гликолей не обладают данными недостатками, поэтому их использование выглядит наиболее целесообразно [2, 3]. В данной работе изучалась и сопоставлялась тепловая проводимость бинарных растворов гликоль-гликоль и гликоль-вода. Тепловая проводимость является одной из основных характеристик теплообмена при мощном кратковременном тепловыделении.

Одной из мотиваций данного исследования послужила гипотеза Л.П. Филиппова о появлении дополнительного (относительно аддитивных значений) теплового сопротивления жидкости при добавлении в неё второго компонента [4]. Предположено, что источником дополнительного теплового сопротивления являются неоднородности концентраций и, следовательно, плотности, а главным определяющим фактором – величина объема смешения (v^E), выраженная через плотности раствора и исходных компонентов. Исследованные в данной работе бинарные системы обладают различными отклонениями свойств от идеального состояния. Растворы гликоль-вода обладают большим по модулю отрицательным объемом смешения, а растворы гликоль-гликоль – малым по модулю положительным объемом смешения.

Цель данного исследования – получение нового знания о тепловой проводимости растворов с большими и малыми по модулю и различными по знаку значениями объема смешения v^E в широкой области изменения температуры и, по полученным результатам, уточнение степени общности обсуждаемой гипотезы по отношению к растворам с различными типами межмолекулярного взаимодействия и отклонениями свойств от идеальности.

Для исследования и сопоставления значений тепловой проводимости растворов применен метод управляемого импульсного нагрева проволочного зонда, в режиме термостабилизации [5]. Суть данного режима состоит в создании кратковременных квази-изотермических условий для импульсно нагреваемого зонда диаметром 20 мкм в веществе при соответствующем регулировании мощности его нагрева $P(t)$. При

нагреве температура зонда увеличивается от начального значения T_0 до выбранного значения $T_{st}(t_2 > t_1) \approx const$ за время порядка $t_1 \sim 10^{-4}$ с и в дальнейшем поддерживается постоянной на заданном интервале времени. Далее рассчитывается тепловая проводимость $K_T(t)$ при заданном температурном напоре $\Delta T = T_{st} - T_0$:

$$K_T(t) = \frac{P(t)}{\Delta T \cdot S_w}, \quad (1)$$

где S_w – площадь поверхности зонда. Величина дополнительного теплового сопротивления в растворе рассчитывалась по следующей формуле:

$$\Delta K_T = \frac{K_{Tadd}(t) - K_T(t)}{K_{Teq}(t)}, \quad (2)$$

где $K_{Tadd}(t)$ – аддитивные значения тепловой проводимости; K_{Teq} – аддитивная эквимолярная тепловая проводимость.

Исследуемые растворы характеризуются полной совместимостью исходных компонентов. Опыты проведены при атмосферном давлении. Для водных растворов изменение T_{st} составляло (90—150)°C, для растворов гликолей – (75—300)°C. То есть, исследования проводились как в области устойчивых состояний, так и в области перегретых (относительно линии равновесия жидкость-пар) состояний. Времена наступления конвекции для исследуемых растворов составляли более 100 мс. Тепловая проводимость изучалась на сравнительно коротких временах, отвечающих кондуктивному режиму теплоотдачи. Обнаруженные концентрационные зависимости дополнительного теплового сопротивления в растворах имеют слабую температурную и временную зависимость в исследованных диапазонах.

Список литературы:

1. Незамерзающие теплоносители / Беликов С.Е. М: Аква-Терм. 2013. С.56.
2. Шадрин Л.Д., Федоров С.М. Использование теплоносителей в системах автономного теплоснабжения // Сборник материалов XXVII Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. 25 апреля 2019г., г. Ижевск. С 89-96
3. Железный В.П., Ивченко Д.А., Рябикин С.С., Шимчук Н.А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств нанотеплоносителей на основе растворов пропиленгликоль-вода // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. С 64-66.
4. Филиппов Л.П., Кравчун С.Н. О теплопроводности растворов жидкостей // ЖФХ. 1982. Т. 56. № 11. С. 2753-2756.
5. Багинский А.В., Волосников Д.В., Скрипов П.В., Смотрицкий А.А. Изучение теплового сопротивления растворов в широкой области изменения температуры. 1. Методика исследований // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15. № 3. С. 399-405.

*Авторы выражают благодарность
Елиной Светлане Юрьевне за помощь в подготовке
опытов. Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 19-19-00115,
<https://rscf.ru/project/19-19-00115/>*

УДК 536.3 536.42

РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ДВУХФАЗНОЙ ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЕ С ПОГЛОЩАЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГАЗОМ

Слепцов С.Д.¹, Саввинова Н.А.²

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,
677000, Россия, Якутск, ул. В.Г. Белинского, 58

Большинство полупрозрачных сред в природе имеют различные включения и являются двухфазными, в том числе лед. Лед, и особенно озерный лед, содержит включения в виде пузырьков с поглощающими излучение газами, такими как воздух, природный газ, метан и другие газы. Большинство из этих газов могут являться парниковыми и при таянии высвободиться в окружающую среду, поэтому исследование в этой области является актуальными. В работах [1 - 2] влиянием поглощения излучения газом в пузырьках во льду пренебрегали, рассматривая полупрозрачную среду в основном как светорассеивающую. В [3] представлена математическая модель нагрева и таяния льда в высокогорном озере Нгоринго в Синьцзян-Тибетском плато (КНР). Данная модель показала хорошее согласие с результатом полевых наблюдений, и авторы рекомендуют использовать модель для прогнозирования состояния рек, озер и морского льда. Однако в модели не учитывается объемное поглощение излучения различными включениями. Целью данной работы является физико-математическая модель радиационно-кондуктивного теплообмена во льду с пузырьками поглощающего излучение модельного газа.

Постановка задачи аналогична [1] и соответствует условиям, созданным в [4]: в климатической камере с температурой $T_{\infty}=273$ К, на непрозрачной, вертикальной подложке из бакелита закреплен слой льда, облучаемый искусственным источником излучения с температурой накала нити 3200 К. Лед представляет собой рассеивающий и поглощающий излучение полупрозрачный материал, содержащий в пузырьках, равномерно распределенных по объему с долей f_V и со средним радиусом r_b , селективно поглощающий излучение модельный газ. Для учета селективного поглощения газовой фазы использована аддитивная способность объемного коэффициента поглощения: $\alpha_j = \alpha_{ice,j} + \alpha_{gas,j}$, где j – номер спектральной полосы. Спектральные свойства льда и источника излучения также аналогичны [1].

Решение задачи проводится следующим образом: за счет поглощения во льду и в модельном газе и рассеяния излучения плоским слоем льда, рассматривается нагрев плоского слоя полупрозрачной среды, до достижения правой облучаемой границей температуры таяния T_f . Решение комбинированной задачи сводится к определению температурных полей, плотности результирующего радиационного потока и роста температуры необлучаемой поверхности льда со временем, представляющей собой плоский слой селективно поглощающей, излучающей и рассеивающей двухфазной среды.

На рисунке 1 представлена динамика роста необлучаемой стороны льда при разных значениях $\alpha_{gas,j}$. Можно заметить, что при разных вариациях этого параметра наблюдается не только заметный рост температуры, но и скорость нагрева слоя льда, как в длинноволновой части спектра, так и в короткой.

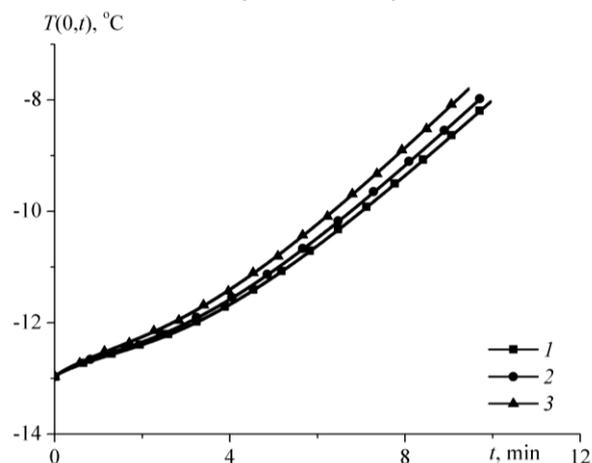


Рис. 1. Динамика роста температуры левой необлучаемой границы льда при разных значениях $\alpha_{gas,j}$ (1 - $\alpha_{gas,1} = \alpha_{gas,2} = 0$ м⁻¹, 2 - $\alpha_{gas,1} = 0,5$ м⁻¹, $\alpha_{gas,2} = 0$ м⁻¹, 1 - $\alpha_{gas,1} = 0$, $\alpha_{gas,2} = 0,5$ м⁻¹).

Полученные результаты позволяют оценить вклад спектрального диапазона в нагрев и скорость роста температуры льда и будут полезны для различных мониторинговых служб.

Список литературы:

- Слепцов С.Д., Саввинова Н.А. Моделирование таяния льда на вертикальной подложке // ТиА, 2022. Т. 29. №4. С. 665-670.
- Dombrovsky L.A., Kokhanovsky A.A. Solar heating of ice sheets containing gas bubbles // J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer. 2020. V.250. P. 106991.
- Dombrovsky L.A., Kokhanovsky A.A. Solar heating of ice-covered lake and ice melting // J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer. 2023. V.294. P. 108391.
- Seki N., Sugawara M., Fukusaki S. Radiative Melting of Ice Layer Adhering to a Vertical Surface // Wärme- und Stoffübertragung, 1979. V.12. Iss. 2. P. 137-144.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН 121031800219-2

УДК 621.9

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ ЭКОЛОГИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Солодовников С.Ф.¹, Игуменов И.К.¹, Шутилов Р.А.¹, Лукашов В.В.²¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Термобарьерные покрытия (ТБП) защищают элементы конструкций (например, лопатки турбин) от экстремальных температур. Существует острая необходимость в поиске новых материалов, с параметрами превосходящими используемый в настоящее время оксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия. В связи с этим возникает необходимость поиска новых материалов ТБП, обладающих высокой температурой плавления, высокой фазовой стабильностью, низкой теплопроводностью, относительно высоким коэффициентом теплового расширения, хорошей химической и механической стабильностью при рабочих температурах [1, 2]. Многие тугоплавкие оксиды на основе оксида алюминия, диоксида титана, циркония, гафния, редкоземельных элементов (например, флюориты $(Ce, RE)O_{2-x}$, пирохлоры $A_2^{3+}B_2^{4+}O_7$, гранаты $(Y_3Al_5O_{12}, Y_3Al_xFe_{5-x}O_{12}, Du_3Al_5O_{12})$, монацит $(LaPO_4)$, Перовскиты $A^{2+}B^{4+}O_3$, гексаалюминаты $(CaAl_{12}O_{19}, LaMgAl_{11}O_{19})$ и др. рассматриваются как потенциальные ТБС-материалы. Большинство этих соединений имеют симметричную каркасную структуру, но некоторые из них имеют слоистую $(BaLa_2Ti_3O_{10}, RE_2SrAl_2O_7)$ или цепочечную $(Y_4Al_2O_9)$ структуру. Однако в последнее время потребность в экологически чистых покрытиях, не оказывающих токсического воздействия на окружающую среду при их производстве, усиливается в связи с усилением внимания к проблеме экологии и жестким обязательным контролем. Большинство упомянутых перспективных материалов ТБП имеют в качестве прототипов природные минералы. Как видно, натуральные или экологически безопасные барьерные покрытия продемонстрировали потенциал для защиты от износа опоры в газовых турбинах. Основная функция экологически чистого ТБП состоит в том, чтобы защитить сплавы от окисления под воздействием высокой температуры/давления в среде горения. Таким образом, благоприятный для окружающей среды ТБП должен быть плотным и термохимически стабильным, в высшей степени непроницаемым для переноса кислорода, фазово-стабильным в интересующем диапазоне температур, устойчивым к термическим напряжениям, возникающим в результате циклического характера операции, и устойчивым к воздействию посторонних частиц. В данной работе мы исследуем природный минерал - геленит $(Ca_2Al_2SiO_7)$ для возможного применения в качестве материала для термобарьерных покрытий. По данным термоциклирования образцов модельных покрытий (Рис.1) подобраны оптимальные

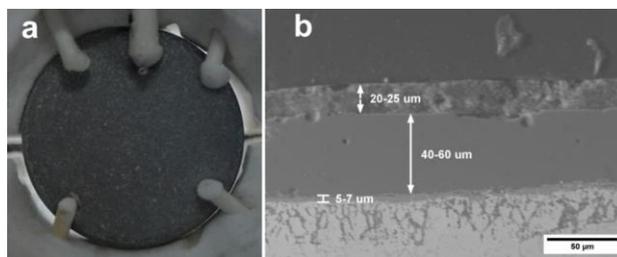


Рисунок 1. Образцы сплава с покрытием перед термоциклированием. (а) Оптические изображения подложки после нанесения геленитового покрытия; (б) СЭМ-изображения поперечного сечения образца, покрытого геленитом.

условия приготовления трещиновато-пористых сред с использованием геленитовых покрытий, нанесенных на стандартные образцы жаропрочного сплава семейства Inconel™ (IN792-5A), используемого при изготовлении лопаток турбин. Термостойкая связка представляла собой слой NiCrAlY толщиной 40–60 мкм. Следует отметить, что при высокой температуре связующее покрытие NiCrAlY окисляется с образованием термически выращенного оксидного слоя. Этот слой может замедлить дальнейшее окисление связующего покрытия, выступая в качестве диффузионного барьера. На образцы дополнительно наносили слой YSZ толщиной 5-10 мкм. Этот слой был нанесен для компенсации коэффициента теплового расширения. Во всех случаях толщина слоя геленита составляла 20-25 мкм.

Обнадешивают экспериментальные данные по термоциклированию геленитовых покрытий на основе природного минерала. Температура разрушения слоя (1600 К) достаточно высока. Другие параметры геленита, такие как его высокая температура плавления (1863 К), отсутствие фазовых переходов до 1273 К, в совокупности с уже упомянутой низкой теплопроводностью и высоким коэффициентом термического расширения, обуславливают необходимость более детального изучения этого материала в качестве термобарьерного покрытия.

Список литературы:

1. Ghosh S., Thermal Barrier Ceramic Coatings – A Review // Advanced Ceramic Processing, InTech2015.
2. Lakiza S.M., Grechanyuk M.I., Ruban O.K., Redko V.P., Glabay M.S., Myloserdov O.B., Dudnik O.V., Prokhorenko S.V. Thermal Barrier Coatings: Current Status, Search, and Analysis// Powder Metall. Met. Ceram., 2018, v. 57, P. 82-113.

Работа выполнена при поддержке РФФ
грант № 23-13-00117

УДК 536.212:669.721.5

КАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Li_2Ca

Хайрулин А.Р., Самошкин Д.А., Станкус С.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В последние годы исследование сплавов тройной системы Mg-Li-Ca вызывает все больший интерес как с фундаментальной точки зрения, так и для анализа перспектив прикладного использования данных материалов. Сплавы на основе магния являются одними из самых легких конструкционных материалов. Добавка лития в состав магниевое сплава значительно облегчает его, что крайне важно для аэрокосмической отрасли [1]. Для упрочнения без потери пластичности в состав сплавов Mg-Li можно добавить кальций [2]. В то же время кальций, согласно [3] существенно улучшает коррозионную стойкость сплавов Mg-Li , а также ингибирует воспламенение расплавленного Mg . Другая перспективная области применения сплавов Mg-Li-Ca это медицина, где данные сплавы могут быть использованы в качестве нового класса биоматериалов, поскольку обладают большей биосовместимостью и биоразлагаемостью по сравнению с используемыми в настоящее время имплантатами [4].

Для комплексного исследования теплофизических свойств системы Mg-Li-Ca необходимо исследовать свойства двойных систем (Mg-Li , Mg-Ca , Li-Ca). В данной работе были проведены измерения энтальпии и теплоемкости сплава Li_2Ca в интервале температур от 298 до 875 К, включающем твердое и жидкое состояния.

В интервале температур от 415 до 875 К измерения проводились на массивном калориметре смешения с изотермической оболочкой [5]. Ниже 415 К и до комнатной температуры для измерений использовался дифференциально-сканирующий калориметр DSC 404 F1 фирмы NETZSCH [6]

Процедуры по приготовлению исследуемого сплава осуществлялись в перчаточном боксе в атмосфере высокочистого аргона. Исходными компонентами были литий чистоты 99,95 масс. % и кальций чистоты 99,75 масс. %. Состав готовился весовым методом с использованием аналитических весов с погрешностью ± 2 мг. Ошибка определения состава образца не более 0,02 ат. %. Готовый образец помещался в ампулу из тантала, которая герметизировалась электродуговой сваркой.

Во время проведения термического анализа при охлаждении из жидкого состояния было обнаружено два тепловых эффекта. Первый соответствует кристаллизации расплава (503,7 К), природа второго (414,7 К) пока что не ясна. Стоит отметить, что в литературе отсутствует информация о наличии твердофазного перехода у соединения Li_2Ca , однако данный тепловой эффект проявился и во время исследований других теплофизических свойств сплава в нашей лаборатории. Результаты измерения энтальпии и теплоемкости представлены на рис. 1. Ниже температуры предполагаемого твердофазного перехода (АТ) дан-

ные были получены методом дифференциально-сканирующей калориметрии, выше (ТВ) – методом калориметрии смешения.

По результатам исследований были построены температурные зависимости энтальпии и теплоемкости и составлены таблицы рекомендуемых значений, рассчитаны теплоты фазовых переходов. Стоит отметить, что данные по энтальпии и теплоемкости сплава Li_2Ca получены впервые и на данный момент остаются единственными.

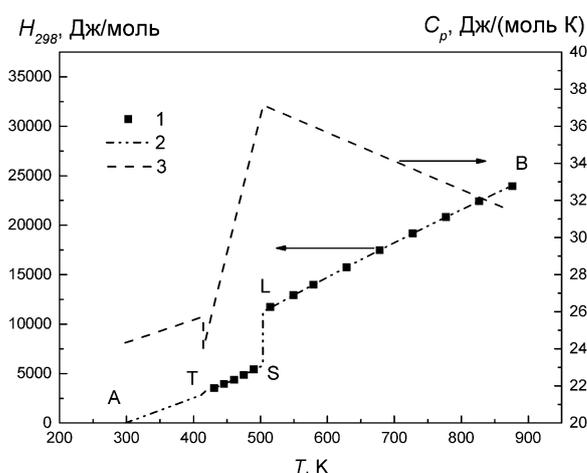


Рис. 1. Измеренные значения энтальпии (1), ее аппроксимация (2) и температурная зависимость теплоемкости (3) сплава Li_2Ca в твердом (AS) и жидком (LB) состояниях.

Список литературы:

1. Haferkamp H., Niemeyer M., Boehm R., Holzkamp U., Jaschik C., Kaese V. Development, processing and applications range of magnesium lithium alloys // Materials Science Forum. 2000. Vol. 350. P. 31–42.
2. Zhou, Y., Bian, L., Chen, G., Wang, L., & Liang, W. Influence of Ca addition on microstructural evolution and mechanical properties of near-eutectic Mg-Li alloys by copper-mold suction casting // Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 664. P. 85–91.
3. Sakamoto M., Akiyama S., Ogi K. Suppression of ignition and burning of molten Mg alloys by Ca bearing stable oxide film // Journal of Materials Science Letters. 1997. Vol. 16, No. 12. P. 1048–1050.
4. Xia D., Liu Y., Wang S., Zeng R.C., Liu Y., Zheng Y., Zhou Y. In vitro and in vivo investigation on biodegradable Mg-Li-Ca alloys for bone implant application // Science China Materials. 2019. Vol. 62, No. 2. P. 256–272.
5. Станкус С.В., Савченко И.В., Яцук О.С. Высокотемпературный калориметр смешения для исследования веществ и материалов в твердом и жидком состояниях // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 4. С. 150–156.
6. Самошкин Д.А., Станкус С.В. Удельная теплоемкость гадолиний-скандий-галлиевого и кальций-ниобий-галлиевого гранатов // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 6. С. 1051–1056.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (проект № 20-79-10025,
<https://rscf.ru/project/20-79-10025/>)

СЕКЦИЯ 10

**Фундаментальные основы расчёта
и принципов построения энергетических систем,
основанных на эффекте сверхпроводимости**

УДК 621.9

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКСИАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Борщев Н.О.

Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д.13.

При проектировании тепловыделяющего оборудования, идет параллельное проектирование его системы теплового режима (СОТР). В данном случае рассматривается тепловое проектирование СОТР литий – ионного аккумулятора, теплоотвод от которого обеспечивается N количеством тепловых аммиачных труб на выносной радиатор – излучатель. АТТ работают на принципе испарение – конденсация, где испарительный участок – место крепления к тепловыделяющему устройству, участок конденсации – выносной радиатор – излучатель.

В настоящей работе рассматривается метод выбора проектных параметров аксиальных тепловых труб (АТТ) [1-4] в составе СОТР, используемых для термостатирования литий-железо-фосфатного аккумулятора. Данный метод основан на параметрической идентификации исследуемых параметров сходя из среднеквадратичного функционала невязки.

В качестве варьируемых проектных параметров были выбраны количество АТТ и их внешний диаметр. Данная задача решается как многопараметрическая задача минимизации рассматриваемого среднеквадратичного отклонения от критической температуры, при которой данное устройство штатно работает. В качестве метода оптимизации среднеквадратичного отклонения выбран метод сопряженных направлений, как наиболее точный метод первого порядка сходимости.

Данная задача включает в себя следующую последовательность действий:

Задание начальных приближений для количества АТТ и внешнего диаметра;

Решение «прямой» задачи прогрева конструкции методом тепловых балансов (сосредоточенных параметров) при задании начально-граничных условий расчета (тепловые подводимые мощности и температура в начальный момент времени), моделируя условия штатной эксплуатации конструкции (лучисто - конвективный теплообмен с окружающей средой) В

качестве метода решения семейства дифференциальных уравнений, описывающих тепловое состояние системы выбран метод Рунге – Кутта 4 порядка точности;

Составление среднеквадратичной ошибки между теоретическим и критическим(предельным) температурным полем аккумулятора;

Решение двух сопряженных задач по поиску компонент градиента целевого функционала невязки между теоретическим и критическим температурным полем. Данная задача решается простым дифференцированием постановки «прямой» задачи теплообмена по исследуемым двум параметрам и также численно решается метод Рунге – Кутта 4 порядка;

Вычисление шага спуска в методе сопряженных направлений на основе метода итерационной регуляризации, исходя из минимума среднеквадратичного отклонения на каждой итерации;

Получение следующих итерированных приближений проектных параметров СОТР устройства;

Проверка критерия останова итерационного процесса. В случае его выполнения, параметризованные величины считаются искомыми, иначе необходимо повторно выполнить пункты 1-6.

Список литературы:

1. Вершинин С.В., Майданик Ю.Ф. Гибкие миниатюрные контурные тепловые трубы // Тепловые процессы в технике. 2012. № 12. С. 559–565.
2. Zalmanovich S., Goncharov K. Radiators with LHP. International conference “Heat Pipes for Space Application” (Moscow, 15–18 September, 2009). Moscow, 2009, p.17-21
3. Копяткович Р.М., Гуля В.М., Тулин Д.В., Шабарчин А.Ф. Тепловое проектирование и пофрагментная наземная отработка системы обеспечения теплового режима космического аппарата негерметичного исполнения на базе сотовых панелей с тепловыми трубами // Космонавтика и ракетостроение. 2010. Вып. 3 (60). С. 33-41.
4. Панин Ю.В., Антонов В.А., Балыкин М.А. К вопросу проектирования и эксплуатации ТТ в составе СТР посадочных модулей межпланетных станций для исследования тел солнечной системы // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2021. № 4. С. 31–38.

УДК 533.6.071.4

ДИНАМИКА ДВОЙНЫХ ПРИПОДНЯТЫХ СТРУЙ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ

Добросельский К.Г.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Поле течения, связанное со струей в поперечном потоке, имеет широкое применение в энергетических установках, благодаря своим характеристикам смешения в ближней зоне [1]. Поперечные струи также встречаются в системах контроля окружающей среды, включая рассеяние из дымоходов и шлейфов дымовых труб. Многократный впрыск газового топлива часто встречается в промышленности, в газовых турбинах электростанций, где смешивание топлива и воздуха имеет решающее значение для снижения выбросов загрязняющих веществ. Он также используется для получения быстрого и стабильного изотермического и/или неизотермического перемешивания струй [2].

В работе представлено экспериментальное исследование распространения вертикальных приподнятых круглых струй, вдуваемых нормально в сносный воздушный поток, с использованием термоанемометрического метода измерения скорости. Использовался аэродинамический канал незамкнутого типа [3] длиной 5,5 м и поперечным сечением 0,8×0,5 м. Рассмотрено взаимодействие двух поперечных изотермических струй между собой и сносным потоком. На рис. 1 представлена схема эксперимента. Струи истекают из трубок с внутренним диаметром $d = 22$ мм (внешний диаметр 28 мм) под прямым углом к направлению движения воздушного потока.

В ходе эксперимента исследовался следующий режим: скорость сносного потока $u_1 = 1,8$ м/с, скорость воздуха на выходе из трубок $u_0 = 4,7$ м/с, расстояние между осями трубок (струй) $L/d = 2,73$.

Для исследования динамики струй был выбран метод визуализации течения посредством построения изолиний скорости (изотах) в сечениях $x = \text{const}$, $y = \text{const}$, $z = \text{const}$; с последующим анализом изолиний от сечения к сечению. Значения скорости от нижних к большим показаны градиациями серого цвета от черного к белому.

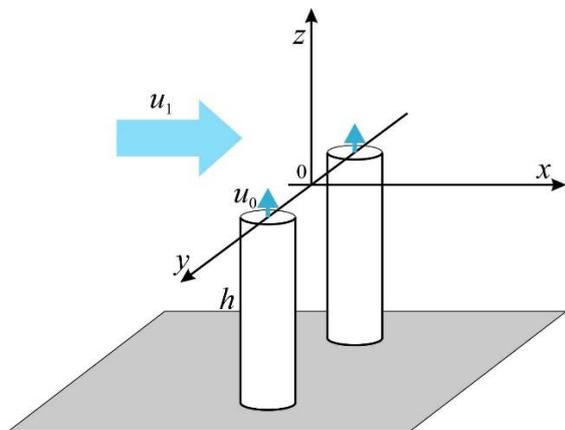


Рис.1. Измерительная схема.

На рис. 2 приведена картина течения одной из струй для $y = -3$ см (осевое сечение). По вертикали и

горизонтали – координаты z (см) и x (см), соответственно.

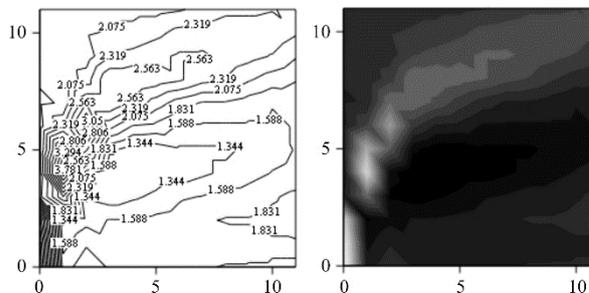


Рис.2. Струя в поперечном потоке: сечение $y = -3$ см.

Были рассмотрены изолинии скорости в сечениях $z = \text{const}$. Для этих сечений характерна картина, представленная на рис. 3. По горизонтальной и вертикальной осям отложены значения координат x (см) и y (см) соответственно.

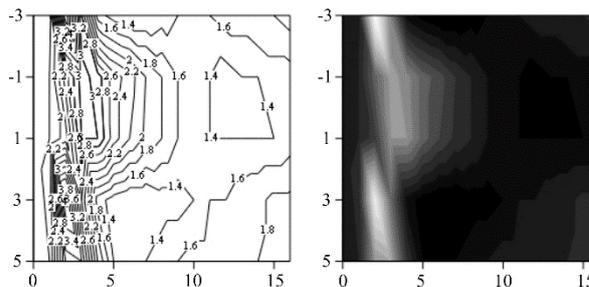


Рис. 3. Сечение $z = 3,5$ см.

Анализ показал, что картина исследуемого течения является очень сложной; две струи нельзя считать распространяющимися свободно, поскольку их поведение в значительной мере определено взаимодействием с вихревой зоной, расположенной под струями. Вихревая зона образована наложением следа от трубок и зоны замедленного течения, расположенной под каждой из струй и обусловленной влиянием сносного потока. Исследуемые струи сливаются лишь на большом расстоянии ($x > 10d$) от места их выхода в поток. До этого они распространяются практически раздельно, взаимодействуя, но не смешиваясь.

Список литературы:

1. Karagozian Ann R. The jet in crossflow // Phys. Fluids. 2014. V. 26. P. 101303.
2. Radhoane A., Mahjoub Said N., Mhiri H. et al. Thermal field of twin variably elevated tandem jets in crossflow // Defect and Diffusion Forum. 2014. V. 348. P. 155-161.
3. Dobrosel'skii K.G. Investigation of the action of a transverse flow on injected normally vertical elevated low-head jets // J. Eng. Phys. Thermophys. 2012. Vol. 85. No. 6. P. 1390-1396.

Работа выполнена по госконтракту с ИТ СО РАН

УДК 536.2

КРИЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООТДАЧИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ ПОЛЕЙ МАССОВЫХ СИЛ**Жуков В.Е., Павленко А.Н., Мезенцева Н.Н.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Создание электрических машин с использованием эффекта высокотемпературной сверхпроводимости является очень сложной технической задачей. Для решения этой задачи необходимо привлечение научных знаний, технических и технологических решений из многих областей науки и техники. Использование различных типов модифицирующего покрытия способно повысить коэффициент теплоотдачи и величину критического теплового потока. В данной работе изучается влияние центробежных ускорений интенсивностью до $3230g$ на величину критического теплового потока при кипении в жидком азоте на теплоотдающей поверхности, модифицированной методом аддитивных технологий.

Достижение критической плотности теплового потока с переходом к пленочному кипению в жидком азоте в условиях большого объема было реализовано на теплоотдающих поверхностях *ТП-1* и *ТП-2*. Поверхность *ТП-1* без модифицирующего покрытия, поверхность *ТП-2* имеет пористое покрытие, изготовленное методом 3Д-печати. Конструкция рабочих участков и параметры модифицирующего покрытия подробно описаны в [1]. На *ТП-1* величина критической плотности теплового потока $q_{cr1} = 142000 \text{ Вт/м}^2$, что несколько ниже расчета по формуле Кутателадзе (1) [2]:

$$q_{cr1} = kr \sqrt{\rho''} \cdot \sqrt[4]{g \sigma (\rho' - \rho'')} \quad (1)$$

Расчетная величина q_{cr1} по соотношению (1) при $k = 0.14$ равна 17700 Вт/м^2 . На *ТП-2* величина q_{cr1} составляет 260000 Вт/м^2 .

На установке «Вращающийся криостат» [3] были проведены эксперименты по определению величины q_{cr1} в условиях полей массовых сил высокой интенсивности. Плотность теплового потока повышалась при фиксированном значении центробежной перегрузки. На теплоотдающей поверхности *ТП-2* при величине центробежной перегрузки $\eta = 100$ была достигнута плотность теплового потока 790000 Вт/м^2 , при которой наблюдалось резкое повышение температуры греющего элемента рабочего участка. При перегрузке $\eta = 200$ была достигнута плотность теплового потока 810000 Вт/м^2 , при которой произошло разрушение греющего элемента. При $\eta = 2400$ резкий разогрев греющего элемента наблюдался при плотности теплового потока 890000 Вт/м^2 , а при $\eta = 3230$ при плотности теплового потока 710000 Вт/м^2 . Полученные опытные данные представлены на рис. 1.

На диаграмме показаны значения критического теплового потока, рассчитанного по формуле Кутателадзе для значений перегрузки 1, 100 и 1000 при соответствующих данным условиям свойствах жидкости и пара. Также на диаграмме представлены следующие

опытные данные: 1 – критический тепловой поток при нормальной гравитации и при перегрузке 100; 2 – максимальный тепловой поток, при котором произошло разрушение греющего элемента рабочего участка *ТП-2* (перегрузки 200 и 3260). Поскольку опытные данные при нормальной гравитации для модифицированной поверхности *ТП-2* существенно превышают опытные данные для немодифицированной поверхности *ТП-1* и расчет по формуле (1), то был произведен пропорциональный пересчет для перегрузок 100 и 1000 относительно расчета по формуле (1) для этих поверхностей. Расчетные данные для поверхностей *ТП-1* и *ТП-2* при перегрузках 100 и 1000 представлены на диаграмме как *ТП-1* расчет и *ТП-2* расчет. Анализ данных, представленных на диаграмме, показывает, что при перегрузке 100 ее влияние на величину критического теплового потока на модифицированной поверхности *ТП-2* вполне удовлетворительно описывается гидродинамической моделью Кутателадзе, в которой учтены факторы массовых сил и давления. При более высоких перегрузках были достигнуты критические тепловые потоки, определяемые не гидродинамикой процесса, а термической прочностью греющих элементов.

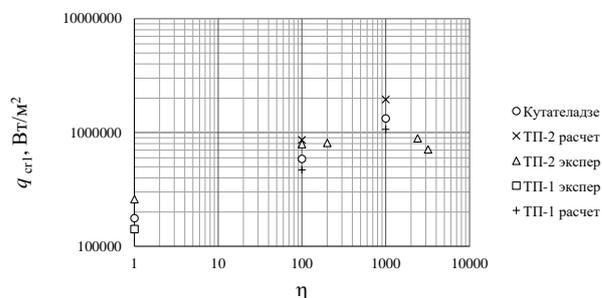


Рис. 1. Зависимость q_{cr1} от величины центробежной перегрузки для различных ТП.

Список литературы:

1. Павленко А.Н., Жуков В.Е., Мезенцева Н.Н. Теплоотдача и критический тепловой поток на модифицированной поверхности при кипении в условиях естественной конвекции // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 3. С. 445-449
2. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М. 1979. 416 с.
3. Zhukov V.Y., Lutcet M.O. Heat Transfer in a liquid nitrogen at high centrifugal acceleration fields. In: Kakas, S., Smirnov, H.F., Avelino, M.R. (eds) Low temperature and Cryogenic Refrigeration. // Springer, NATO Science Series. 2003. V. 99. P. 221-240.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РФ в лице Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-770)

УДК 536.413, 536.42

ПЛОТНОСТЬ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ТО-29-2

Козловский Ю.М., Станкус С.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Существенным фактором, ограничивающим широкое применение современных силовых и энергетических установок (СЭУ) на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), является применение диэлектрических изделий сложной формы [1]. Одним из возможных путей решения данной проблемы может служить создание полимерных композиционных материалов (ПКМ) методом вакуумной инфузии [2]. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование теплового расширения ПКМ на основе эпоксидного связующего марки ТО-29-2, легированных нитридом алюминия (AlN).

Измерения термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) выполнены dilatометрическим методом на установке DIL-402С по методике [3] в интервале температур 100–300 К со скоростью нагрева-охлаждения печи 5 К/мин. Оцениваемая погрешность определения ТКЛР не превышает 2%.

Всего исследовано семь составов ПКМ с содержанием AlN от 0 до 50 масс. %. На рис. 1 представлены первичные данные по ТКЛР одного из исследованных образцов, сглаженные методом Савицкого-Голея. Видно, что результаты последовательных экспериментов демонстрируют хорошую воспроизводимость. Поведение коэффициента расширения монотонно, без резких изменений или скачков.

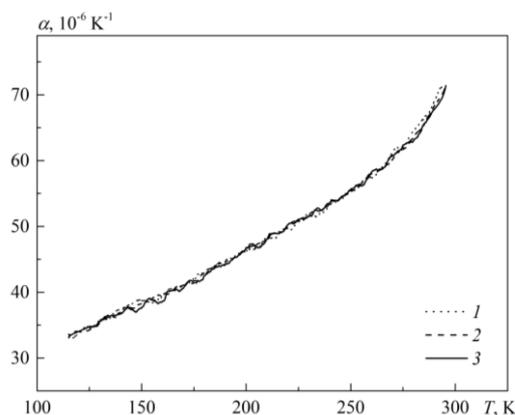


Рис. 1. Первичные данные по тепловому расширению ПКМ с содержанием 10% AlN.

1 – 1-й нагрев; 2 – 2-й нагрев; 3 – 3-й нагрев.

Сглаженные температурные зависимости ТКЛР рассчитаны аппроксимацией исходных данных методом наименьших квадратов степенными полиномами, а значения относительного удлинения ε (рис. 2) получены интегрированием этих уравнений с условием равенства нулю значения $\varepsilon(T)$ при $T = 293,15$ К. Плотность при комнатной температуре определялась по массе и геометрическим размерам образцов.

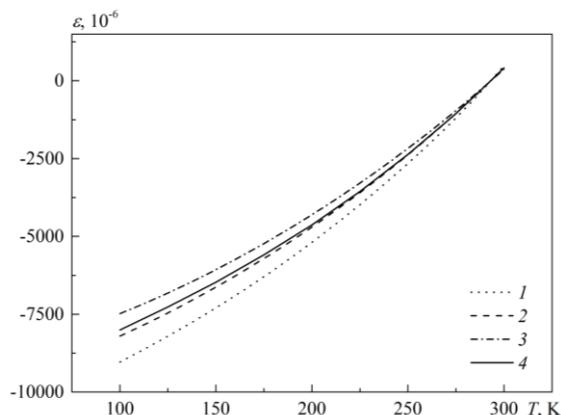


Рис. 2. Относительное удлинение исследованных ПКМ. 1 – 10% AlN; 2 – 20% AlN; 3 – 50% AlN; 4 – ТО-29-2.

Концентрационная зависимость ТКЛР представлена на рис. 3. Из графика видно, что зависимость имеет немонотонный характер. Добавление нитрида алюминия в количестве до 10% значительно увеличивает как ТКЛР, так и относительное удлинение. Однако при высоком содержании легирующего соединения ТКЛР меньше, чем у образца ТО-29-2 без включений AlN.

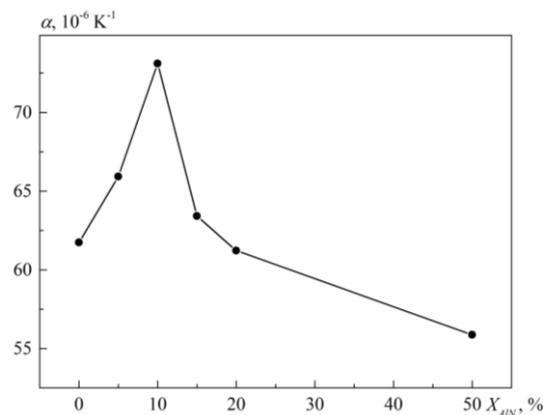


Рис. 3. Концентрационная зависимость ТКЛР ПКМ при $T = 300$ К.

Список литературы:

1. Крюков Д.О., Манусов В.З. Обзор конструкций трансформаторов со сверхпроводящими обмотками // *Электричество*. 2019. № 8. С. 4–16.
2. Дробышев А.С., Купчишин А.И., Мурадов А.Д. и др. Влияние низких температур на изменение состава системы «полимер – высокотемпературный сверхпроводник» // *Известия НАН РК. Серия физико-математическая*. 2008. № 6. С.1–6.
3. Козловский Ю.М., Станкус С.В. Тепловое расширение сверхпроводящих лент в области низких температур // *Теплофизика и аэромеханика*. 2021. Т. 28. № 4. С. 641–644.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-770)

УДК 536.242

**ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ КИПЕНИЯ АЗОТА
НА МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЯХ****Кузнецов Д.В., Павленко А.Н.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Несмотря на то, что на сегодняшний день в литературе представлено обширное количество работ, посвященных экспериментальному и теоретическому исследованию различных аспектов процессов тепло- и массопереноса при кипении жидкости, на сегодняшний день не существует завершенной теории теплообмена при пузырьковом кипении. Для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении различных жидкостей в литературе приводятся десятки полуэмпирических соотношений, зачастую описывающих лишь узкий диапазон изменения режимных параметров. До сих пор ведется активное экспериментальное исследование внутренних характеристик пузырькового кипения при варьировании системных параметров (сочетание жидкость/материал нагревателя, давление, шероховатость поверхности и т. д.) для верификации имеющихся моделей и разработки новых.

Пузырьковое кипение жидкости является одним из наиболее эффективных способов отвода тепла от поверхности нагрева. Тем не менее, возрастающие мощности тепловыделения энергонапряженных устройств и оборудования, а также снижение массогабаритных параметров теплообменных аппаратов стимулируют развитие методов повышения коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых нагрузок при кипении. На сегодняшний день одними из наиболее перспективных методов в данной области являются методы, связанные с прямой модификацией теплообменных структур и покрытий на микро/нано масштабе, о чем свидетельствует большое количество современных обзорных работ [1, 2].

Целью настоящей работы является исследование влияния трехмерных капиллярно-пористых (ТКП) покрытий с различной микроструктурой, полученных методом направленного плазменного напыления, на динамику парообразования и теплообмен при кипении жидкого азота в условиях стационарного тепловыделения при атмосферном давлении.

В качестве рабочих участков использовались медные цилиндрические трубки внешним диаметром 16 мм и толщиной стенки 3 мм. Покрытия на исходную поверхность наносились методом направленного плазменного напыления [3] с использованием порошка бронзы БрАМц 9-2 и представляют собой квазиупорядоченные пористые гребни и каналы.

В работе были получены кривые кипения вплоть до критического теплового потока (КТП) для гладкого нагревателя и трех модифицированных нагревателей. При толщине остаточного слоя покрытия порядка 700 мкм и высоте гребней 1270 мкм наблюдалась значительная деградация коэффициента теплоотдачи относительно гладкого участка. При значении данного пара-

метра в диапазоне 50-100 мкм была получена интенсификация теплообмена (до 3.5 раз в области малых тепловых потоков). Наличие ТКП-покрытий приводило к увеличению критического теплового потока до 1.8 раз для покрытия с максимальной пористостью.

Для всех исследованных нагревателей проведена высокоскоростная видеосъемка процесса кипения. На основе опытных данных получены основные микрохарактеристики пузырькового кипения (динамика роста и отрыва паровых пузырей, плотность центров парообразования). Показано, что плотность активных центров парообразования на ТКП-покрытиях остается практически неизменной при увеличении мощности тепловыделения и при тепловых потоках выше (1-2) Вт/см² лежит ниже аналогичных значений для гладких участков. При этом центры парообразования при кипении жидкого азота на гладком участке в области малых тепловых потоков не являются стабильными. В тоже время на всех ТКП-покрытиях наблюдалась непрерывная парогенерация.

Характерной особенностью пузырькового кипения азота на модифицированных нагревателях в области высоких тепловых нагрузок (выше значения КТП на гладком нагревателе) являлось значительное снижение угла наклона кривой теплообмена. Повышение плотности теплового потока в данном режиме сопровождалось существенными периодическими колебаниями температуры поверхности амплитудой (1-2) К. Анализ кадров видеосъемки кипения показал схожий пульсирующий характер поведения межфазной границы с частотой пульсаций (18-24) Гц. По всей поверхности нагревателя образовывались толстые «паровые чулки», которые периодически отрывались от поверхности нагрева, обеспечивая последующий подток жидкости к теплоотдающей поверхности. После чего происходила интенсификация парообразования с формированием новых паровых конгломератов. Именно этот периодический процесс, сопровождающийся соответствующими изменениями паросодержания в пристенном двухфазном слое и доли общей смоченной поверхности, определяет наблюдаемое снижение теплоотдачи в предкризисных режимах.

Список литературы:

1. Liang G., Mudawar I. Review of Pool Boiling Enhancement by Surface Modification. // Int. J. Heat Mass Transf. 2019. Т. 128. С. 892–933.
2. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // ТВТ. 2021. Т. 59. №. 2. С. 280-312.
3. Kalita V.I., Komlev D.I., Komlev V.S., Radyuk, A.A. The shear strength of three-dimensional capillary-porous titanium coatings for intraosseous implants // Mater. Sci. Eng. 2016. Т. 60. С. 255–259.

УДК 621.365.5:538.945

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВЛепешкин А.Р.^{1,2}¹Московский авиационный институт «НИИУ»,
125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 4²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

Индукционный нагрев алюминия, обладающего высокой удельной электропроводностью, является одним из самых известных электротехнологических процессов, используемых в цветной металлургии, особенно в электротехнологиях горячей обработки цветных металлов давлением. Традиционные индукционные нагреватели представляют собой сплошной соленоид (индуктор), создающий переменное во времени магнитное поле, и конвейерную ленту, по которой в нагревательную установку поступают новые заготовки, нагревающиеся в процессе транспортировки внутри индуктора [1]. Установки такого типа обладают большими энергетическими потерями за счет водяного охлаждения медных узлов и их КПД обычно не превышает 40-60%.

Для повышения энергетической эффективности и энергосбережения процесса индукционного нагрева [1, 2] в последние годы была разработана принципиально новая технология, которая заключается в использовании сверхпроводящих материалов для возбуждения магнитного поля высокой интенсивности [3, 4]. Данная энергосберегающая технология основана на способности сверхпроводников проводить постоянный ток практически без потерь. Нагрев в таких установках осуществляется за счет токов, индуцируемых в заготовке при ее вращении в постоянном магнитном поле.

В данной работе при вращении заготовки с постоянной скоростью в направленном перпендикулярно оси её вращения (рис. 1) постоянном магнитном поле сверхпроводникового устройства, состоящего из двух сверхпроводниковых индукторов (MgB₂) постоянного тока, магнитный поток изменяется периодически по гармоническому закону, что приводит к появлению вихревых индуцируемых токов в нагреваемой вращающейся алюминиевой заготовке.

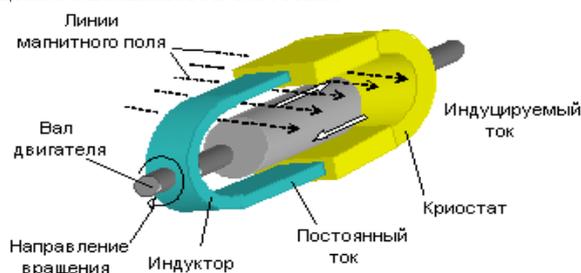


Рис. 1. Сверхпроводниковое устройство для нагрева вращающейся цилиндрической алюминиевой заготовки в постоянном магнитном поле.

Для двумерного моделирования исследуемого процесса был выбран метод конечных элементов, где в качестве исходных конечных элементов используются четырехугольные элементы для цилиндрической

заготовки и элементов сверхпроводящих индукторов. Частота вращения данной заготовки 3000 об/мин во внешнем однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0.5 Тесла. В этом случае распределение температуры и термических напряжений по сечению вращающейся алюминиевой заготовки в процессе индукционного нагрева описывается взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитного и температурного полей и параметрами по термонапряжениям [1]. Указанная математическая конечно-элементная модель разработана в виде комплекса программ “Induction systems” на языке C++ (авторы Лепешкин С.А. и Лепешкин А.Р.). С использованием разработанного комплекса программ рассчитаны параметры электромагнитного поля, режимы нестационарного нагрева и термонапряженного состояния алюминиевой цилиндрической заготовки с учетом ограничений на максимальную температуру 500 °С и ограничения на термические напряжения по пределу текучести 100÷110 МПа. Для момента времени 90 сек получены векторное поле токов, распределение напряженности магнитного поля, распределения температуры и осевых термонапряжений по сечению заготовки.

Из анализа результатов расчета получено, что перепады температур не превышают 50÷60 °С и, что осевые термонапряжения, наблюдаемые по сечению заготовки, не превышают предела текучести 100-120 МПа материала алюминиевой цилиндрической заготовки. Кроме того, из анализа тепловых расчетов получено, что для нагрева заготовки до 500 °С под обработку давлением в технологическом процессе требуется мощность 130 кВт, что значительно меньше ожидаемой мощности 200 кВт. Более того, КПД нагрева с помощью сверхпроводниковых индукторов может достигнуть 80-90 %.

Полученные методики, модели и результаты можно использовать для нагрева вращающихся дисков, изделий и заготовок в машиностроении, металлургии и энергетике.

Список литературы:

1. Лепешкин А.Р. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях: монография / А.Р. Лепешкин, А.Б. Кувалдин, М.: ИНФРА-М, 2023. 273 с.
2. Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б., Ильинская О.И., Федин М.А., Кулешов А.О. Моделирование нагрева вращающихся дисков в электромагнитном поле с использованием постоянных магнитов // Известия Российской Академии наук. Серия Физическая. 2021. Том 85, № 11. С. 1532-1534.
3. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А. Способ получения энергии и устройство для его реализации. Пат. 2416869 РФ, опубл. 20.04.2011, бюл. № 11.
4. Magnusson N., Runde M. J. Phys.: Conf. Ser., 2006, V. 43, 1019.

УДК 536.2.023, 536.2.081.7, 536.631,

КАЛОРИЧЕСКИЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Самошкин Д.А., Козловский Ю.М., Агажанов А.Ш., Станкус С.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Проведено экспериментальное исследование комплекса теплофизических свойств (теплопроводность, температуропроводность, удельная теплоемкость) перспективных полимерных композиционных материалов на основе эпоксидного связующего, обладающих низким коэффициентом теплового расширения, хорошей электроизоляцией и теплопроводностью, которые используются при разработке и создании современных силовых и энергетических установок на основе ВТСП-устройств. Исследовались образцы ПКМ на основе эпоксидных смол с маркировкой STYCAST 2850 FT иностранного производства и ТО-29-2 отечественного производства, а также ТО-29-2 с содержанием 5, 10, 15, 20 и 50% AlN.

Удельная теплоемкость (c_p) исследуемых образцов ПКМ определялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии [1] на установке DSC 404 F1, температуропроводность (a) – методом лазерной вспышки [2] на автоматизированной установке LFA-427, теплопроводность (λ) – методом нестационарного плоского источника тепла [3] на установке Hot Disk TPS 2500S. Эксперименты были выполнены в широком интервале температур 78...185–400 К в атмосфере аргона чистотой 99,992 об.% для c_p или в атмосфере осушенного воздуха для a и λ . Оцениваемые погрешности полученных данных, подтвержденные измерениями эталонных материалов, составили 2–3%, 2% и 5% для c_p , a и λ , соответственно.

Экспериментальные результаты по c_p и λ полимерных композиционных материалов марки ТО-29-2 при 300 К в зависимости от содержания AlN (X_{AlN}) представлены на рис. 1, 2.

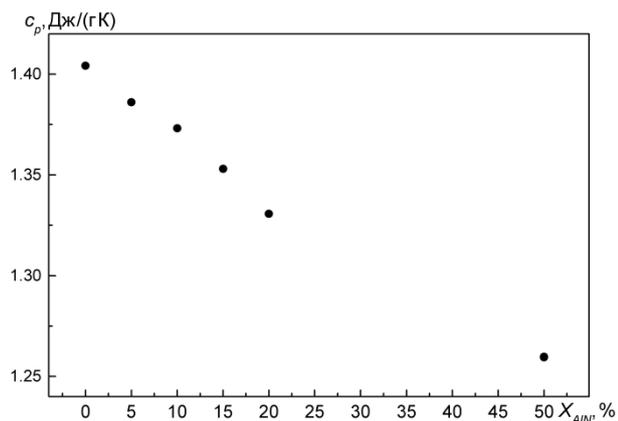


Рис. 1. Концентрационная зависимость удельной теплоемкости при 300 К ПКМ марки ТО-29-2 с содержанием AlN.

Из рисунков видно, что с увеличением X_{AlN} удельная теплоемкость ПКМ монотонно убывает, теплопроводность возрастает, при этом в области концентраций 15–20% λ претерпевает скачек и выше 20% начинает более резкий рост.

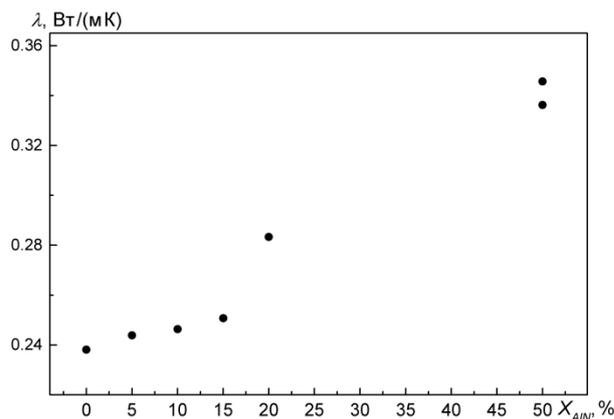


Рис. 2. Концентрационная зависимость теплопроводности при 300 К ПКМ марки ТО-29-2 с содержанием AlN.

Впервые получены экспериментальные данные по калорическим и транспортным свойствам ПКМ на основе эпоксидного связующего двух марок STYCAST 2850 FT и ТО-29-2 с содержанием 0–50% AlN в широком интервале отрицательных и положительных температур, используемых при создании сверхпроводящего энергетического оборудования. Установлено влияние неорганической составляющей на свойства полимерных композитов. По результатам проведенных измерений получены аппроксимационные уравнения и таблицы рекомендуемых значений теплофизических свойств для всего интервала измерений, оценены их погрешности.

Список литературы:

1. Самошкин Д.А., Станкус С.В. Удельная теплоемкость гадолиний-скандий-галлиевого и кальций-ниобий-галлиевого гранатов // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29. № 6. С. 1051–1056.
2. Agazhanov A.Sh., Abdullaev R.N., Samoshkin D.A., Stankus S.V. Thermal conductivity and thermal diffusivity of Li-Pb eutectic in the temperature range of 293–1273 K // Fusion Engineering and Design. 2020. V. 152. No. 111456. P. 1–5.
3. Heisig L.M., Wulf R., Fieback T.M. Investigation and Optimization of the Hot Disk Method for Thermal Conductivity Measurements up to 750° C // International Journal of Thermophysics. 2022. V. 44. No. 6. P. 82.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-770)

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1 Процессы в разреженных газах и плазме, газофазный синтез наноструктур	3
ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ И ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	4
Аньшаков А.С. Алиферов А.И. Домаров П.В. Фалеев В.А.	
РАЗРЕЖЕННЫЙ РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ НЕДОРАСШИРЕННОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ	5
Быков Н.Ю. Горбачёв Ю.Е. Фёдоров С.А.	
ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПРЯМОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА ДЛЯ КЛАСТЕРОВ С ОБЩЕЙ ПАМЯТЬЮ	6
Быков Н. Ю. Фёдоров С. А.	
УРАВНЕНИЯ ГАЗОДИНАМИКИ ПРИ ЧИСЛЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ, ПРЕВОСХОДЯЩЕМ ЧИСЛО СТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ ИНВАРИАНТОВ.....	7
Горбачев Ю.Е. Шоев Г.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАССЕЙЯНИЯ ЧАСТИЦ СВЕРХЗВУКОВОГО КЛАСТИРОВАННОГО ПОТОКА МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ.....	8
Деринг Е.Д. Дубровин К.А. Зарвин А.Е. Каляда В.В.	
ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ПАРОВАЯ КОНВЕРСИЯ МЕТАНА В МИКРОКАНАЛЬНОМ РЕАКТОРЕ	9
Димов С.В. Гасенко О.А.	
О ФОРМИРОВАНИИ ВНЕШНЕГО КЛАСТЕРНОГО ПОТОКА В СВЕРХЗВУКОВОМ ИСТЕЧЕНИИ.....	10
Дубровин К.А. Зарвин А.Е. Каляда В.В. Яскин А.С. Деринг Е.Д.	
ТЕРМОДИНАМИКА РАВНОВЕСНАЯ, НЕРАВНОВЕСНАЯ, ДИСКРЕТНАЯ. ЕЁ ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НА ОСНОВЕ КВАНТА ДЕЙСТВИЯ	11
Дулин М.Н.	
СИНТЕЗ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУИ СМЕСИ ГАЗОВ, АКТИВИРОВАННЫХ СВЧ РАЗРЯДОМ.	12
Емельянов А.А. Пинаев В.А. Плотников М.Ю. Ребров А.К. Тимошенко Н.И. Юдин И.Б.	
ГАЗОСТРУЙНЫЙ МРСVD СИНТЕЗ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ РАЗЛИЧНОГО МАТЕРИАЛА.....	13
Емельянов А.А. Плотников М.Ю. Тимошенко Н.И. Юдин И.Б.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ РАЗРЕЖЕННЫХ СТРУЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ КЛАСТЕРЕ УНИВЕРСИТЕТА	14
Зарвин А.Е. Дубровин К.А. Каляда В.В. Художитков В.Э. Яскин А.С. Деринг Е.Д.	
ТЕРМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ТОРЦА КАНАЛА	15
Знаменская И.А. Муратов М.И.	
ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПТЕРЬ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПРИ СИНТЕЗЕ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ.....	16
Зобов К.В. Хартаева Э.Ч. Бардаханов С.П. Труфанов Д.Ю. Гапоненко В.Р.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕМПИРУЮЩИХ МОМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ «ПОДВИЖНАЯ СТЕНКА»	17
Кашковский А.В. Королёв А.А.	
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОСТРУЙНЫХ ИОННО-КЛАСТЕРНЫХ ПУЧКОВ.....	18
Коробейщиков Н.Г.	
МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАЗРЕЖЕННЫХ НАНОГАЗОВЗВЕСЕЙ.....	19
Краснолуцкий С.Л. Лежнев Е.В. Рудяк В.Я.	
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБЕЧАЙКИ ВИНТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯЧЕЙКИ МУЛЬТИРОТОРНОЙ ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ	20
Крюков А.В. Зверков И.Д. Куликов В.В. Чехов В.П.	
СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С КЕРАМИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.....	21
Литвинцев А.С. Молчанова А.Н. Погосбекян М.Ю. Крупнов А.А. Бондарь Е.А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛОИДНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИНВЕРТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ И БУРОВЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ.....	22
Лысакова Е.И. Скоробогатова А.Д. Жигарев В.А.	
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СИНТЕЗА НА РАЗМЕР ЗЕРНА ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ ПОСЛЕ ОТЖИГА.....	23
Меркулова И.Е. Замчий А.О. Лунев Н.А. Константинов В.О. Баранов Е.А.	

УЧЕТ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ НИЗКОКАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В МЕТОДЕ ПРЯМОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	24
Молчанова А.Н. Литвинцев А.С. Кашковский А.В. Ващенко П.В. Бондарь Е.А.	
ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНАЯ ДВУХТЕМПЕРАТУРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА В ПЛАЗМЕ	25
Пашин А.В.	
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ	26
Перепечко Л.Н. Тимошенко Н.И. Тихонович В.В. Шарина И.А.	
СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕДИ ОБРАБОТКОЙ ПЛАЗМОЙ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА	27
Петрова А.В. Сафонов А.И.	
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	28
Попов Г.А. Петухов В.Г.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНОГО ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА ИЗ СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА В ВАКУУМ И ФОНОВЫЙ ГАЗ.....	29
Приходько В.Г. Ярыгин В.Н. Ярыгин И.В.	
РЕНОРМАЛИЗОВАННОЕ ДВУХЧАСТИЧНОЕ КИНЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ БОЛЬЦМАНА ДЛЯ ПАР КВАЗИЧАСТИЦ И ЕГО СВОЙСТВА.....	30
Савельев В.Л.	
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ОБЪЁМНОГО ЗАРЯДА ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ ЦЕПОЧЕК ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ, ЛЕВИТИРУЮЩИХ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ.....	31
Сальников М.В. Федосеев А.В. Сухинин Г.И.	
ВЛИЯНИЕ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И КАЧЕСТВО НАНОЧАСТИЦ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НАНОПОРОШКОВ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ	32
Труфанов Д.Ю. Зобов К.В. Бардаханов С.П. Гапоненко В.Р. Чакин И.К.	
ФОРМИРОВАНИЕ КВАЗИОДНОМЕРНЫХ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА	33
Федосеев А.В. Ефименко Д.Б. Васильева Е.В. Литвиненко В.В. Васильев М.М. Петров О.Ф.	
ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ЛАТУНИ МЕТОДОМ ИСПАРЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ.	34
Хартаева Э.Ч. Номоев А.В. Бардаханов С.П. , Зобов К.В. Труфанов Д.Ю. Гапоненко В.Р.	
ГЕНЕРАЦИЯ В СОПЛЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ СМЕСЕЙ МЕТАНА С БУФЕРНЫМ ГАЗОМ ДЛЯ ИНИЦИАЦИИ ИОННО-КЛАСТЕРНЫХ РЕАКЦИЙ В СТРУЯХ.....	35
Художитков В.Э. Зарвин А.Е. Каляда В.В.	
ДИНАМИКА АЭРОЗОЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ В РАЗРЕЖЕННОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ	36
Черемисин А.А. Кушнарченко А.В.	
ВЛИЯНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ КЛАСТЕРОВ АРГОНА НА СВЕРХЗВУКОВОЕ ИСТЕЧЕНИЕ В РАЗРЕЖЕННУЮ АТМОСФЕРУ	37
Ярков Л.В. Зайцев А. В. Бондарь Е.А.	
60 ЛЕТ В СТРУЕ	38
Ярыгин В.Н.	
СЕКЦИЯ 2 Конвективные течения и теплообмен в однофазных средах	39
НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ КОДА HYDRA-IVRAE/LM ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССОВ В РУ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ.....	40
Алипченков В.М. Грудцын Я.В. Мосунова Н.А. Палагин А.В.	
ОПТИЧЕСКАЯ ГИЛЬБЕРТ-ТОМОГРАФИЯ ГАЗОВЫХ СТРУЙ	41
Арбузов В.А. Арбузов Э.В. Дубнищев Ю.Н. Лукашов В.В. Золотухина О.С.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ ПАРАФИНА В КИРПИЧЕ С ВОЗДУШНОЙ ПОЛОСТЬЮ	42
Бондарева Н.С. Шеремет М.А.	
ТЕПЛООБМЕН ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОТРЫВНОМ ОБТЕКАНИИ УГЛА СЖАТИЯ	43
Босняков С.М. Запрягаев В.И. Кавун И.Н. Трубицына Л.П.	
ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ РАСПЛАВА В НЕПОДВИЖНОМ ТИГЛЕ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ В МЕТОДЕ ЧОХРАЛЬСКОГО В РЕЖИМЕ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ.....	44
Бердников В.С. Винокуров В.А. Винокуров В.В. Кислицын С.А.	
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА НА ДИСПЕРСИЮ ПРИМЕСИ В ГОРОДСКОМ КАНЬОНЕ	45
Васи́ев И.Р. Федорова Н.Н.	

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ГАЗА В НАГРЕВАЕМОЙ 7-МИ СТЕРЖНЕВОЙ СБОРКЕ С ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ ВСТАВКАМИ	46
Витовский О.В. Макаров М.С. Лебеда Л.С. Наумкин В.С.	
ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, РАСХОДА ЖИДКОСТИ И РАССТОЯНИЯ ДО НАГРЕВАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СПРЕЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ.....	47
Владыко И.В. Мисский Н.Б. Назаров А.Д. Суртаев А.С.	
РЕКОНСТРУКЦИЯ МГНОВЕННОГО ПОЛЯ СКОРОСТИ ПО ЛОКАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ТЕРМОАНЕМОМЕТРОМ И ПРЕДЫДУЩИМ PIV ИЗМЕРЕНИЯМ	48
Гобызов О.А. Пантелеев С.А. Токарев М.П.	
ИЗМЕРЕНИЕ ОСЕВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТРУБАХ РАНКА КРУГЛОГО И КВАДРАТНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ.	49
Гордиенко М.Р. Кабардин И.К. Какаулин С.В. Правдина М.Х. Полякова В.И.	
ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПОДВОДЯЩЕГО КАНАЛА НА ГАЗОДИНАМИКУ И ТЕПЛООБМЕН СТАЦИОНАРНОГО ПОТОКА ГАЗА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ В ЦИЛИНДР (ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОРШНЕВОМУ ДВИГАТЕЛЮ).....	50
Давыдов Д.А. Красильников Д.Н. Лаптев А.Д. Плотников Л.В. Следнев В.А. Шурупов В.А.	
УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КОНИЧЕСКОМ ДИФфуЗОРЕ ПРИ СОПЛОВОЙ ПОДАЧЕ ВОЗДУХА	51
Давыдов Д.А. Красильников Д.Н. Медведев В.А. Плотников Л.В. Смирных М.Д.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ С ПОМОЩЬЮ КОДА HYDRA-IBRAE/LM.....	52
Ильясова О.Х. Алипченков В.М. Мосунова Н.А.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАСАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА СТЕНКЕ В ТРУБАХ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ.....	53
Кашинский О.Н. Курдюмов А.С.	
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КАЛИБРОВКИ КАМЕР ДЛЯ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ЧАСТИЦ.....	54
Кирчанова Е.Е. Токарев М.Ю. Дулин В.М.	
ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРЯЖЕННОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ С ПРОДОЛЬНОМ ГРАДИЕНТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ НА НИЖНЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ГРАНИЦЕ	55
Кислицын С.А. Бердников В.С.	
АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ	56
Кудинов В.А. Трубицын К.В. Котова Е.В. Гаврилова Т.Е.	
ФОРМИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ РАЗГОННОМ ТЕЧЕНИИ КУЭТТА С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННО – ВРЕМЕННОЙ НЕЛОКАЛЬНОСТИ	57
Кудинов В.А. Трубицын К.В. Котова Е.В. Стефанюк Е.В. Гаврилова Т.Е.	
МЕТОД ПОГРУЖЕННОЙ ГРАНИЦЫ В ЗАДАЧЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ТЕЛА И ЖИДКОСТИ.....	58
Куранаков Д.С. Есипов Д.В.	
РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТТЕСТОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА «ЗАКРЫТИЕ ОТСЕЧНЫХ КЛАПАНОВ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ» НА СТЕНДЕ ПСБ-ВВЭР	59
Латкин Д.Ю. Петкевич И.Г.	
ЛАМИНАРИЗАЦИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ КСЕНОНА ПРИ ВДУВЕ ГЕЛИЯ.....	60
Лебеда К.С. Сахнов А.Ю. Наумкин В.С. Брызгалов К.В.	
ТРЕХМОДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ РЕЙНОЛЬДСА.	61
Леманов В.В. Шаров К.А. Лукашов В.В.	
РАЗВИТИЕ ЯВНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ РЕЙНОЛЬДСА ДЛЯ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛАХ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ.....	62
Ли Х. Яковенко С.Н.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ «ТРУБА В КАНАЛЕ» В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ	63
Лучинкин Н.А. Разуванов Н.Г. Полянская О.Н.	
ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СТЕНКИ И ИНДУКЦИИ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТУРБУЛЕНТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ РТУТИ В НЕОДНОРОДНО ОБОГРЕВАЕМЫХ ТРУБАХ	64
Макаров М.В. Артемов В.И. Яньков Г.Г.	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО СОПРЯЖЕННОГО КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ ПЛОСКИХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ.....	65
Митин К. А. Кислицын С. А. Бердников В. С.	
ГЕМОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ УВЕЛИЧЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ СОСУДИСТЫХ ТРАНСПЛАНТАНТОВ.....	66
Молочников В.М. Мазо А.Б. Калинин Е.И. Пашкова Н.Д. Никифоров И.В.	
ВЛИЯНИЕ ВДУВА ГЕЛИЯ НА ЛОКАЛЬНУЮ ЛАМИНАРИЗАЦИЮ В УСКОРЕННОМ ПОТОКЕ КСЕНОНА	67
Наумкин В.С. Сахнов А.Ю. Брызгалов К.В. Лебеда К.С.	
ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРЕТОЙ СТРУИ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ	68
Небучинов. А.С.	

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ИМПАКТНЫХ СТРУЯХ.....	69
Небучинов А.С.	
ЗАДАЧИ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ В МОДЕЛЯХ РЕЛАКСИРУЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ.....	70
Петрова А.Г., Пухначев В.В., Фроловская О.А.	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ДВУХСПИРАЛЬНОЙ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ В ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ.....	71
Сентябов А.В. Платонов Д.В. Скрипкин С.Г. Шторк С.И.	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ ЦИЛИНДРОВ.....	72
Сероштанов В.В. Селезнева М.Д. Яковлева В.В. Князев С.А. Гусаков А.А.	
ПРОДОЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ПРИСТЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ.....	73
Сиковский Д.Ф.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОГРУЖЕННОЙ ПЛАСТИНЫ В РАЗВИТОМ СВОБОДНО КОНВЕКТИВНОМ СЛОЕ.....	74
Филимонов С.А. Гаврилов А.А.	
ВЛИЯНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ИМПАКТНЫХ КРУГЛЫХ СТРУЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	75
Филиппов М.В. Чохар И.А. Терехов В.В. Терехов В.И.	
ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОРИСТЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА.....	76
Хайруллин А.Р. Хайбуллина А.И. Сиявлин А.А.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПУЧКЕ ТРУБ ПРИ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЯХ ПОТОКА.....	77
Хайруллин А.Р. Хайбуллина А.И.	
ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА НАСОС-ТУРБИНЫ.....	78
Чирков Д.В. Скороспелов В.А. Турук П.А. Ригин В.Е. Устименко А.С.	
РЕГУЛИРУЕМАЯ ПОДАЧА ГАЗА В ПРОЦЕССЕ ОБЩЕГО КРИОВОЗДЕЙСТВИЯ.....	79
Шакуров А.В.	
ПЛОСКОПРАЛЛЕЛЬНЫЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛОПЕРЕНОС В ГАЗЕ.....	80
Шалаев В.И. С.Т. Калугин, Г.В. Толоко, В.А. Токарев	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА МИШЕНИ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНВЕКТИВНОМ МИКРОСТРУЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ.....	81
Шамирзаев А.С. Мордовской А.С. Кузнецов В.В.	

СЕКЦИЯ 3 Методы управления турбулентностью и интенсификация теплопереноса.....82

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ V-ОБРАЗНОЙ МОДЕЛИ ЛЕТАЮЩЕГО КРЫЛА С ОРГАНАМИ УПРАВЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ.....	83
Алпацкий Н.С. Павленко А.М. Мельник Е.А. Каприлевская В.С. Занин Б.Ю.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ С ОРЕБРЕНИЕМ, РАСПОЛОЖЕННЫМ ПОД УГЛОМ К ПОТОКУ.....	84
Барсуков А.В. Терехов В.В. Терехов В.И.	
ПОЛОЖЕНИЕ ПЕРЕХОДА НА СТРЕЛОВИДНОМ КРЫЛЕ ПРИ НАЛИЧИИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ШЕРОХОВАТОСТИ.....	85
Бойко А.В. Бородулин В.И. Иванов А.В. Мищенко Д.А.	
ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПЕРЕХОД В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВДУВА/ОТСОСА ИЛИ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ.....	87
Бойко А.В. Кириловский С.В. Поплавская Т.В.	
ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПО РАЗМАХУ КАНАВОК И ЗАВИХРЕННОСТИ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА НА ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ СКОЛЗЯЩЕГО КРЫЛА.....	88
Бородулин В.И. Иванов А.В. Качанов Ю.С.	
ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА СКОЛЗЯЩЕМ КРЫЛЕ В ПРИСУТСТВИИ ДВУМЕРНЫХ СТУПЕНЕК ПОВЕРХНОСТИ И ТРЁХМЕРНОЙ ЗАВИХРЕННОСТИ ПОТОКА.....	89
Бородулин В.И. Иванов А.В. Качанов Ю.С.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗВУКОВОЙ КРУГЛОЙ СТРУИ С ПОПЕРЕЧНЫМИ АКУСТИЧЕСКИМИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ.....	90
Ванькова О.С. Яковенко С.Н.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ НА ТЕПЛООБМЕН В СИНТЕТИЧЕСКИХ КРУГЛЫХ СТРУЯХ ВОЗДУХА ПРИ НИЗКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА.....	91
Герасимов А.С. Леманов В.В.	

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА НА РАЗВИТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ	92
Гетман П.В. Щелчков А.В. Попов И.А. Зубков Н.Н.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЧЕЧНОГО ОТСОСА ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПОЛОЖЕНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА НА ВОЛНИСТОМ КРЫЛЕ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА	93
Зверков И.Д. Крюков А.В. Чехов В.П.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ПРИ.....	94
ОБТЕКАНИИ СОТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В КАНАЛЕ	94
Золотухин А.В. Терехов В.И.	
ЭФФЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА: ОТ ЛУНОК К НАКЛОННЫМ КАНАВКАМ	95
Исаев С.А. Никущенко Д.В. Судаков А.Г. Лебига В.А.	
СОВМЕЩЕНИЕ PIV И ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕЧЕНИЯ В ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКЕ.....	96
Исаев С.А. Сероштанов В.В. Митяков В.Ю. Сапожников С.З.	
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОПЛА ВНЕШНЕГО РАСШИРЕНИЯ С УЧЕТОМ ТУРБУЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЯ	97
Каун Ю.В. Чернышов М.В.	
К ВОПРОСУ УСТОЙЧИВОСТИ СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СО СЛАБЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ.....	98
Кириловский С.В. Поплавская Т.В. Сидоренко А.А.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЗА ВЕТРОТУРБИНАМИ УЛЬЯНОВСКОГО ВЕТРОПАРКА	99
Ковальников В.Н. Хахалева Л.В. Корнилова М.И. Хахалев Ю.А. Федоров Р.В. Демидов Д.А.	
К ВЛИЯНИЮ РАДИУСА ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ ПЛАСТИНЫ НА ВОСПРИИМЧИВОСТЬ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ СТАЦИОНАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ.....	100
Косинов А.Д. Питеримова М.В.	
ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКАДРОВОГО PIV ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ЗА ЦИЛИНДРОМ С ГИДРОФОБНЫМ ПОКРЫТИЕМ	101
Лебедев А.С. Сорокин М.И.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЛАМИНАРИЗАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ С ПОМОЩЬЮ НАПРАВЛЕННОЙ ВДОЛЬ ПОТОКА СИСТЕМЫ СОТ.....	102
Лукьянов А.А. Пантелеев С.А. Зарипов Д.И.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРУЙНОГО ВИХРЕГЕНЕРАТОРА.....	103
Маркин В.В. Поливанов П.А.	
ОСОБЕННОСТИ ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ МАЛОРАЗМЕРНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КЛАССИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ	104
Мельник Е.А. Павленко А.М. Алпацкий Н.С. Каприлевская В.С. Занин Б.Ю.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕОРИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ, РАЗВИТИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ПОГРАНСЛОЙНЫХ ТЕЧЕНИЯХ.....	105
Мищенко Д.А.	
ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ МОДЕЛИ ЛЕТАЮЩЕГО КРЫЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА	106
Павленко А.М. Занин Б.Ю. Мельник Е.А. Алпацкий Н.С.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЕМ В ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЕ МОДЕЛЬНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ ФРЕНСИСА С ПОМОЩЬЮ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ.....	107
Палкин Е.В. Лутченко И.И. Хребтов М.Ю. Мулляджанов Р.И.	
УПРАВЛЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯМИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ, ВОЗНИКАЮЩИМИ ПРИ БЕЗОТРЫВНОМ ОБТЕКАНИИ СКОЛЬЗЯЩЕГО КРЫЛА С ПОМОЩЬЮ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОТСОСА	108
Садовский И.А. Катасонов М.М.	
ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ КОЛЬЦЕВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ И КОЛЛЕКТОРЕ ВОЗДУХА ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ.....	109
Самсонов А.Н. Быковский Ф.А. Ведерников Е.Ф. Тимофеев П.М.	
ПОЛЯ ДАВЛЕНИЙ ПРИ ИМПАКТНОМ НАТЕКАНИИ ДВУХ КРУГЛЫХ ИМПАКТНЫХ СТРУЙ С ОТЛИЧАЮЩИМИСЯ ЧИСЛАМИ РЕЙНОЛЬДСА	110
Сарсембенов Е. Терехов В.И. Терехов В.В. Филиппов М.В.	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В СУЖАЮЩЕМСЯ ПЛОСКОМ КАНАЛЕ	111
Сахнов А.Ю. Брызгалов К.В. Наумкин В.С. Лебеда К.С.	
ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО PIV МЕТОДА ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ПОТОКА ИМПАКТНОЙ СТРУИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ.....	112
Строева П.С. Ничик М.Ю. Дулин В.М.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СКОРОСТЕЙ В МОДЕЛИ ГИДРОТУРБИНЫ ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕ УПРАВЛЯЮЩИХ СТРУЙ.....	113
Сулов Д. А. Скрипкин С. Г. Литвинов И. В. Гореликов Е. Ю, Цой М. А.	

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ П-ОБРАЗНЫХ ВИХРЕГЕНЕРАТОРОВ НА ТЕПЛООТДАЧУ ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ.....	114
Терехов В.И. Дьяченко А.Ю. Смутьский Я.И. Кульпанович Г.Т.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТСОЕДИНЕННОГО РЕБРА ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ НА ДИНАМИКУ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООТДАЧУ	115
Терехов В.И. Дьяченко А.Ю. Смутьский Я.И. Шаров К.А.	
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ СКОРОСТИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ. ЭКСПЕРИМЕНТ И ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	116
Яворский Н.И.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ОДИНОЧНОЙ ТРАНШЕЙНОЙ ЛУНКОЙ	117
Ян Лун Н. Терехов В.И. Чохар И.А.	

СЕКЦИЯ 4 Гидродинамика, тепломассообмен и волновые процессы в многофазных средах..... 118

ВОДОВОЗДУШНОЕ АЭРОЗОЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ РЯДОВ ИЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ	119
Абед А.Х. Щеклеин С.Е. Климова В.А.	
ДИНАМИКА ПУЛЬСАЦИЙ В КИПЯЩИХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЯХ.....	120
Акашев А.А. Решетников А.В. Скоков В.Н.	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛА И ИСПАРЕНИЯ СЫРЬЯ В ПОТОКЕ ГАЗА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА ОСНОВЕ ЭЙЛЕРОВА ПОДХОДА.....	121
Аксёнов А.А. Жлуктов С.В. Каширин В.С. Сазонова М.Л. Черный С.Г. Зезюлин И.В. Дроздова Е.А. Роде А.А.	
ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА СТРУКТУРУ ФАКЕЛА РАСПЫЛА ЭЖЕКЦИОННОЙ ФОРСУНКИ	122
Архипов В.А. Басалаев С.А. Золоторев Н.Н. Перфильева К.Г.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ МОНОДИСПЕРСНОГО КЛАСТЕРА КАПЕЛЬ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОСХОДЯЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУХА.....	123
Архипов В.А. Басалаев С.А. Золоторев Н.Н. Перфильева К.Г. Усанина А.С.	
МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ МОНОДИСПЕРСНОГО КЛАСТЕРА КАПЕЛЬ	124
Архипов В.А. Басалаев С.А. Золоторев Н.Н. Перфильева К.Г. Усанина А.С.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДЫ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВСПЛЫТИЯ КЛАСТЕРА МОНОДИСПЕРСНЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	125
Архипов В.А. Усанина А.С. Чуркин Р.А.	
СОУДАРЕНИЕ НАПОЛНЕННОЙ ЧАСТИЦАМИ МИКРОГЕЛЯ КАПЛИ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО БИОПОЛИМЕРА С НАНОВОЛОКНИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ЧИСЛА ВЕБЕРА	126
Ашихмин А.Е. Пискунов М.В. Федоров В.С.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦЕВОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ С ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ.....	127
Барткус Г.В. Кузнецов В.В.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ.....	128
Борейшо А.С. Джгамадзе Г.Т. Моисеев А.А. Савин А.В. Смирнов П.Г.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ С ТЕКСТУРИРОВАННОЙ НАНОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРОМ ПОВЕРХНОСТЬЮ	129
Васильев М.М. Шухов Ю.Г. Терехов В.В. Старинский С.В.	
АСИМПТОТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В ГЕМОДИНАМИКЕ	130
Васюткин С.А. Мерзоева Л.Р. Хе А.К. Чупахин А.П. Карпенко А.А.	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛА ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СТРУИ	131
Вожяков И.С. Хребтов М.Ю. Мулляджанов Р.И.	
ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ТУРБУЛЕНТНО-ВОЛНОВОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ.....	132
Гешев П.И.	
ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА НА ПУЧКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ (ОБЗОР)	133
Гогонин И.И. Володин О.А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАЗМЕРА И СКОРОСТИ ПУЗЫРЕЙ ОТ ОДИНОЧНОГО КАПИЛЛЯРА В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ.....	134
Гореликова А.Е. Кашинский О.Н. Чинак А.В.	

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ МЕТОДОМ LOESS ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КАВИТАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ВОДЫ	135
Гришаев Д.А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРИПОЯ В ТРУБКЕ МЕТОДОМ ФАЗОВОГО ПОЛЯ	136
Груздь С.А. Самсонов Д.С. Кривилев М.Д.	
ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ И АКУСТИКИ МНОГОФАЗНЫХ, МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СРЕД С ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ	137
Губайдуллин Д.А.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В АДИАБАТНЫХ УСЛОВИЯХ И В УСЛОВИЯХ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА В ПЛОСКОМ МИКРОКАНАЛЕ	138
Дементьев Ю.А. Роньшин Ф.В. Чиннов Е.А.	
ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ	139
Держо О.Г.	
ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТУРБУЛИЗАТОРОВ ПОТОКА НА ГАЗСОДЕРЖАНИЕ И МАССООБМЕН ПУЗЫРЬКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ	140
Евдокименко И.А. Лобанов П.Д. Блель В. Джентрик К. Си-Ахмед Э-К., Легран Д. Е. Марэк	
НИСКОДИССИПАТИВНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ МНОГОФАЗНОЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ СМЕСИ	141
Есипов Д.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ШЛАМА БУРОВЫМИ РАСТВОРАМИ, МОДИФИЦИРОВАННЫМИ НАНОВОЛОКНАМИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ	142
Жигарев В.А. Минаков А.В. Лысакова Е.И. Скоробогатова А.Д. Гузей Д.В.	
АКСИАЛЬНОЕ И АЗИМУТАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ВОЛН ВОЗМУЩЕНИЯ В ГАЗОЖИДКОСТНОМ ТЕЧЕНИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ	143
Здорников С.А. Исаенков С.В. Черданцев А.В.	
К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ТОНКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАПЕЛЬ ПРИ ПАРОВЫХ ВЗРЫВАХ	144
Ивочкин Ю.П. Ковешников К.С. Кубриков К.Г. Синкевич О.А. Тепляков И.О. Юдин С.М.	
ГАЗИФИКАЦИЯ ЖИДКОГО АЗОТА В СМЕСИТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ	145
Кольшкни Л.М. Шакуров А.В.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА НА ТОРЦЕ ВОЛНОВОДА	146
Косяков В.А. Фурсенко Р.В.	
КАПИЛЛЯРНАЯ ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЯХ В ПОРИСТЫХ СИСТЕМАХ И ЗАСЫПКАХ	147
Кузнецов В.В.	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИИ ЗА ЦИЛИНДРОМ С ТРЕУГОЛЬНЫМИ НАСЕЧКАМИ, РАСПОЛОЖЕННОМ В МИНИКАНАЛЕ	148
Лобасов А.С. Кравцова А.Ю.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕПОДВИЖНОГО СНАРЯДА ТЕЙЛОРА ПРИ РАЗНЫХ СКОРОСТЯХ ОПУСКНОГО ПОТОКА	149
Лукьянов Ан.А. Алексеев М.В.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО НАНОВОЛОКНА ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БУРОВЫХ РАСТВОРОВ	150
Лысакова Е.И. Скоробогатова А.Д. Минаков А.В. Жигарев В.А.	
РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ ПАРОВОДЯНОЙ СРЕДЫ ЧЕРЕЗ ПОГРУЖЕННЫЙ ДЫРЧАТЫЙ ЛИСТ	151
Мелихов В.И. Никулин А.С.	
РАСЧЕТ СТАЦИОНАРНОЙ ВОЛНЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕТОНАЦИИ В МНОГОФАЗНОЙ СИСТЕМЕ «КАПЛИ ВОДЫ, ОКРУЖЕННЫЙ ПАРОВЫМИ ОБОЛОЧКАМИ, В СПЛОШНОМ РАСПЛАВЛЕННОМ СВИНЦЕ»	152
Мелихов О.И. Салех Башар	
ПРИМЕНЕНИЕ МИКРО- И НАНОФЛОИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ИНДУСТРИИ	153
Минаков А.В. Жигарев В.А. Гузей Д.В. Пряжников А.И. Иванова С.В. Пряжников М.И. Лысакова Е.И.	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛН С ГАЗОПРОНИЦАЕМЫМИ ВЫСОКОПОРИСТЫМИ МАТЕРИАЛАМИ	154
Миронов С.Г. Кириловский С.В. Поплавская Т.В. Цырюльников И.С.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ПОТОКЕ В КАНАЛЕ ПОСЛЕ ЕГО ВНЕЗАПНОГО СУЖЕНИЯ	155
Пахомов М.А.	
ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В СМЕСЯХ CH_4/AIR , C_2H_2/AIR /УГОЛЬ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗАКРЫТОМ КАНАЛЕ	156
Пинаяв А.В. Пинаяв П.А.	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ МИКРОГЕЛЯ С ГИДРОФОБНОЙ И ГИДРОФИЛЬНОЙ НАНОВОЛОКНИСТЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ЧИСЛА ВЕБЕРА	157
Пискунов М.В. Пискунова А.Е. Хомутов Н.А.	

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖИДКОСТИ НА ПРЯМОТОЧНОЙ И РОТАЦИОННОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ	158
Радзюк А.Ю.	
РЕЖИМЫ СТЕКАНИЯ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ НА ВЕРТИКАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ ПРИ УГЛАХ СМАЧИВАНИЯ ДО 90° И ЧИСЛЕ РЕЙНОЛЬДСА 50	159
Сахнов А.Ю. Володин О.А. Печёркин Н.И. Павленко А.Н.	
АНАЛИЗ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ КАВИТАЦИОННОГО ОБТЕКАНИЯ КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА: СТАРШИЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОМЕНТЫ ФЛУКТУАЦИЙ СКОРОСТИ.....	160
Северин А.С. Лебедев А.С.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ СТРУЙ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТИ	161
Семионов В.В. Милешкин М.С. Сергеев Е.М. Чиннов Е.А.	
ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАЗРЕЖЕННОМ ГАЗОСПРЕЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ	162
Сибиряков Н.Е. Димов С.В.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ И КОЛЛЕКТОРЕ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ СПИНОВОЙ ДЕТОНАЦИИ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ СМЕСЕЙ ВОДОРОД-ВОЗДУХ	163
Симонов Е.В.	
КАВИТАЦИОННОЕ ОБТЕКАНИЕ КРЫЛА СО СТРУКТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	164
Скрипкин С.Г. Старинский С.В. Цой М.А. Васильев М.М. Кравцова А.Ю.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ УРАВНЕНИЯ ФОРХГЕЙМЕРА-ЭРГУНА ПРИ НАПОРНОМ ТЕЧЕНИИ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ В СЛОЕ ШАРОВЫХ ЧАСТИЦ.....	165
Таиров Э.А. Сафаров А.С. Хан П.В.	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЙЛЕРОВЫХ МОДЕЛЕЙ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПК ANSYS НА ЗАДАЧЕ РАСПЫЛА СЫРЬЯ В ПОТОКЕ ГАЗА-ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПЕЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА	166
Тарраф Даниэль, Черный С.Г.	
КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ВТОРИЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ ПРИ МИКРО-ВЗРЫВНОМ РАСПАДЕ ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ	167
Федоренко Р.М. Антонов Д.В. Стрижак П.А.	
ИНЖЕКЦИЯ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА В ПОРИСТЫЙ ПЛАСТ	168
Хасанов М.К. Бородин С.Л. Столповский М.В.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПЫЛА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ФОРСУНКОЙ С ПРОТИВОВАЩЕНИЕМ	169
Хребтов М.Ю. Жерибор М.О. Мулладжанов Р.И.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВОЛНОВЫХ РЕЖИМОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНКИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ, СТЕКАЮЩЕЙ ПО ВЕРТИКАЛЬНОМУ ЦИЛИНДРУ	170
Цвелодуб О.Ю.	
СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ИСКУССТВЕННОГО АНАЛОГА ПРИРОДНОЙ ШАРОВОЙ МОЛНИИ	171
Черемисин А. А.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМКНУТОГО ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ.....	172
Шарифуллин Б.Р. Наумов И.В. , Тинтулова М.В.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА КРЕМНИЯ НА РЕЖИМЫ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В Y-ОБРАЗНОМ МИКРОКАНАЛЕ	173
Шебелева А.А. Минаков А.В. Пряжников А.И. Шебелев А.В.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕТРОВЫХ ЗОН В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛЕЙ ЗДАНИЙ РАЗНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ.....	174
Шульженко П.Д. Мешкова В.Д. Дектерев А.А.	
ФОРМООБРАЗОВАНИЕ МИКРОСТРУЙ ЛЕТУЧЕЙ ЖИДКОСТИ В РАЗРЕЖЕННОЙ СРЕДЕ	175
Яскин А.С. Зарвин А.Е. Каляда В.В. Дубровин К.А. Художитков В.Э.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕСЫХАНИЯ И КРИЗИСА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ БИНАРНОЙ СМЕСИ R32-R134A В МИКРОКАНАЛАХ	176
Шамирзаев А.С.	
СЕКЦИЯ 5 Тепломассообмен при фазовых переходах.....	177
ДИФфуЗИОННО-КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПРОЦЕССЫ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ Ti+Al+Fe ₂ O ₃ +(Fe+C) В УСЛОВИЯХ РЕАКЦИОННОГО СПЕКАНИЯ	178
Анисимова М.А. Князева А.Г. Коростелева Е.Н. Николаев И.О.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО СИНТЕЗА ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО КОМПОЗИТА С РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ ОПИСАНИЯ КИНЕТИКИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ	179
Анисимова М.А. Чумаков Ю.А. Князева А.Г.	

НАГРЕВ И ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ СФЕРОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ Антонов Д.В. Долгих В.В. Сажин С.С. Стрижак П.А.	180
ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ КАК МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ Бобылев П.Г. Павлов А.В. Сапожников С.З.	181
ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ИСПАРЕНИИ/КИПЕНИИ В УСЛОВИЯХ Пониженного Давления..... Брестер А.Е. Жуков В.И. Павленко А.Н.	182
ВЗРЫВНОЕ ВСКИПАНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ..... Виноградов В.Е. Павлов П.А.	183
РАСЧЕТ НАГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕЛА В ИНДУКТОРЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАЗРАБОТКЕ КОСМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ТИПА..... Виноградов Д.А. Глазков В.В. Ковешников К.С, Тепляков И.О.	184
ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕДНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С НЕОДНОРОДНОЙ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ Владимиров В.Ю. Хмель С.Я. Чиннов Е.А.	185
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ В СОСТАВЕ АЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА Волков Р.С. Керимбекова С.А. Стрижак П.А.	186
ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В МИНИКАНАЛАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ ЖИДКОСТИ Вяземская И.И.	187
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ЧЕТЫРЕХ ДИМЕТИЛОВЫХ ЭФИРОВ ЭТИЛЕНГЛИКОЛЕЙ..... Галкин Д.А. Богатищева Н.С.	188
ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАСТВОРА ГЛИЦЕРИН-ГВАЯКОЛ..... Галкин Д.А. Скрипов П.В.	189
ПРОФИЛИ ТЕМПЕРАТУР ВБЛИЗИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ ВОДА-ВОДЯНОЙ ПАР Гатапова Е.Я.	190
ВЛИЯНИЕ ТЕМПА НАРАСТАНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА КРИВУЮ КИПЕНИЯ Делов М.И. Кузьменков Д.М. Куценко К.В. Лаврухин А.А.	191
ОХЛАЖДЕНИЕ СПРЕЕМ ПОВЕРХНОСТИ, ВОСПРИНИМАЮЩЕЙ ВЫСОКИЕ ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ Демидов А.С. Захаренков А.В. Комов А.Т. Дедов А.В.	192
ТЕПЛООТДАЧА В КРУГЛОМ КАНАЛЕ ПРИ ЦИРКУЛЯЦИИ НЕАЭЗОТРОПНОЙ СМЕСИ Жуков В.Е. Мезенцева Н.Н. Мезенцев И.В. Сухорукова Е.Ю.	193
РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ Зайнуллина Э.Р. Митяков В.Ю.	194
ДИНАМИКА РОСТА ОДИНОЧНОГО ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ..... Зорькина А.И. Роньшин Ф.В. Кабов О.А.	195
ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ РАСПАДЕ НЕУСТОЙЧИВЫХ РАСТВОРОВ В УСЛОВИЯХ МОЩНОГО ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ..... Игольников А.А. Скрипов П.В.	196
ТЕПЛООБМЕН МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ..... Комов А.Т. Дедов А.В. Щербakov П.П. Захаренков А.В. Штелинг В.С. Соколова А.Д.	197
ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА НА МЕЖФАЗНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КОНДЕНСАТ – ПАР: ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ..... Крюков А.П. Пузина Ю.Ю. Жаховский В.В. Левашов В.Ю.	198
ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОКАНАЛЬНЫХ И МИКРОСТРУЙНЫЕ СИСТЕМ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОАПРЯЖЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ Кузнецов В.В. Шамирзаев А.С. Мордовской А.С.	199
ДИНАМИКА РОСТА ПАРОВОГО ПУЗЫРЬКА ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ЦЕНТРОВ НУКЛЕАЦИИ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВЫСТУПЕ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ Левин А.А. Хан П.В. Сафаров А.С.	200
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗНОГО СООТНОШЕНИЯ ВОДЫ С ДОБАВЛЕНИЕМ SDS НА ПРОЦЕСС ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ СЖИЖЕННОГО ГИДРАТООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА В ОБЪЕМЕ ВОДЫ Мелешкин А.В. Марасанов Н.В.	201
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНО АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА ДОДЕЦИЛСУЛЬФАТ НАТРИЯ НА ПРОЦЕСС ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ..... Мелешкин А.В. Марасанов Н.В.	202
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ НИСХОДЯЩЕГО ПАРА ПЕНТАНА НА ПОВЕРХНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА МЕТОДОМ VOF..... Минко К.Б. Клементьев А.А. Андреев С.Н.	203

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ И ПОЛИМЕРИЗАЦИИ КАПЛИ РАСТВОРА H ₂ O/PEGDA/IRGACURE ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ	204
Мисюра С.Я. Бильский А.В. Гобызов О.А. Рябов М.Н. Морозов В.С.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ГАЗОКАПЕЛЬНОМ СТАЦИОНАРНОМ ОРОШЕНИИ ПЛОСКОГО НАГРЕВАТЕЛЯ.....	205
Назаров А.Д. Миськив Н.Б. Серов А.Ф. Мамонов В.Н. Старинская Е.М. Сендир Е.А.	
ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПЛЁНОЧНОГО ОРОШЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБ С РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ	206
Павленко А.Н. Катаев А.И. Миронова И.Б.	
ИЗМЕРЕНИЕ МЕСТНОГО КОЭФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ ПРИ КОПЕНИИ ВОДЫ С ДОБАВЛЕНИЕМ МИКРО- И НАНОЧАСТИЦ AL ₂ O ₃	207
Павлов А.В. Бобылев П.Г. Сапожников С.З.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВАЕМОЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ.	208
Пешенок Ю.А. Куракин А.Ю. Айвазян Г.Е. Гатапова Е. Я.	
УСИЛЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ЗА СЧЕТ РАСПАДА НЕСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ РАСТВОРА	209
Поволоцкий И.И. Волосников Д.В. Скрипов П.В.	
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ТЕПЛООБМЕНА НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КИПЕНИЯ.....	210
Попов И.А. Аксенов Р.А. Лэй Р.А. Степанова Ю.С. Федорова С.А.	
ПРЕДЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ И ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ ТЕПЛООБМЕНА В ПАРОВЫХ КАМЕРАХ	211
Пуховой М.В. Быковская Е.Ф. Кабов О.А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БИОТКАНИ.....	212
Пушкарев А.В. Жидков Д.А.	
ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ СИСТЕМЫ «ОКТАДЕКАН-ПРОПАН/БУТАН»	213
Салихов И.З. Хабриев И.Ш. Хайрутдинов В.Ф. Ахметзянов Т.Р. Абдулагатов И.М.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ЛОКАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА, ЭВОЛЮЦИЮ И СТРУКТУРУ МИКРОСЛОЯ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ.....	214
Сердюков В.С. Малахов И.П. Суртаев А.С.	
ЗАКРУЧЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПАРОВОМ КАНАЛЕ КОРОТКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ	215
Серяков А.В. Конькин А.В. Алексеев Анд.П.	
ЭВОЛЮЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КАПЛИ ЖИДКОСТИ ПРИ ИСПАРЕНИИ С БИОМЕТЕОРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	216
Смирнов Н.И. Старинская Е.М. Миськив Н.Б. Старинский С.В.	
ПРИМЕНЕНИЕ БИФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНОМ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ.....	217
Суртаев А.С. Kosar A. Сердюков В.С. Малахов И.П.	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ВОДЫ С НАГРЕТОЙ ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКИ.....	218
Саломатов В.В. Сыродой С.В. Кузнецов Г.В.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ В ПОТОК СУХОГО ВОЗДУХА ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ	219
Сюзев А.И. Горбачев М.В. Макаров М.С.	
КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ АМОРФНОГО ГАЗОНАСЫЩЕННОГО ЛЬДА, ПОЛУЧЕННОГО ОСАЖДЕНИЕМ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ НА ХОЛОДНУЮ ПОДЛОЖКУ.....	220
Томин А.С. Файзуллин М.З. Виноградов А.В. Коверда В.П.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ.....	221
Федосеев А.В. Сальников М.В. Остапенко А.Е.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ СМЕСИ ПРОПАН/ИЗОБУТАН В МИКРОКАНАЛАХ	222
Шамирзаев А.С. Кузнецов В.В.	
ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ В ТОНКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ.....	223
Швецов Д.А. Павленко А.Н. Жуков В.И.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИПЕНИЯ В МИКРОПОРАХ	224
Шебелев А.В. Лобасов А.С. Зайцев Д.В. Кабов О.А.	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ХЛАДОНА R113 В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ МЕТОДОМ VOF.....	225
Яньков Г.Г. Минко К.Б. Артемов В.И. Серёжкин Л.Н. Лошкарёва Е.А.	

СЕКЦИЯ 6 Процессы переноса при физико-химических превращениях, включая горение.....	226
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ МЕТАНА ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА ВОЗМУЩЕНИЙ	227
Агафонцев М.В. Луценко А.В. , Лобода Е.Л. Рейно В.В.	
ВЛИЯНИЕ ХИМ.СОСТАВА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА НА ПРОЦЕНТНЫЙ СОСТАВ СИНТЕЗ-ГАЗА ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ОТХОДОВ	228
Алексеев С.В.Аньшаков А.С. Домаров П.В. Фалеев В.А.	
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАКЕЛА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ДВУХ ЛАМИНАРНЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ	229
В.В. Козлов, Ю.А. Литвиненко, М.М. Катасонов, А.Г. Шмаков	
ДЕТОНАЦИЯ СИСТЕМ Н ₂ –ВОЗДУХ С ЧАСТИЧНО ДИССОЦИИРОВАННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ	230
Васильев А.А. Васильев В.А.	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО И ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В МАЛОГАБАРИТНОЙ ТОПКЕ	231
Дектерев А.А. Кузнецов В.А. Дектерев Ар.А. Тэпфер Е.С.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИРОЛИТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ГЕНЕРАЦИИ ВОДОРОДА ИЗ МЕТАНА	232
Долгих В.Д. Кудинов В.А. Беляков Н.Р.	
ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИМ РАЗЛОЖЕНИЕМ МЕТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАТАЛИЗАТОРА «НИКЕЛЬ НА КИЗЕЛЬГУРЕ».....	233
Желнов Ю.В. Долгих В.Д. Иванов С.А. Виноградова М.Р. Мелешко Н.В.	
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ БОКОВОЙ СТРУИ СЖАТОГО ВОЗДУХА НА ГОРЕНИЕ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ В КАНАЛЕ	234
Замураев В.П. Калинина А.П.	
БЕСКОНТАКТНЫЙ ПЕРЕНОС ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ГАЗОВУЮ ФАЗУ В ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОМ ПРОЦЕССЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ЛЕТУЧЕГО МЕТАЛЛОКОМПЛЕКСА В ЩЕЛЕВОЙ СТРУКТУРЕ.....	235
Игуменов И.К. Шутилов Р.А. Лукашов В.В.	
РАЗЛИЧНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ПЛОСКОЙ МИКРОСТРУИ ВОДОРОДА НА ДО- И СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ ИЗ СОПЛА	236
Катасонов М.М. Козлов В.В. Литвиненко Ю.А. Шмаков А.Г.	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОТЛЕ	237
Ковальногов В.Н. Федоров Р.В. Генералов Д.А. Карпов Д.А.	
КИНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОСТИЖИМОСТИ ТОЧКИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ ХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	238
Козлова М.А. Шаманский В.А.	
ВЛИЯНИЕ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ.....	239
Крайнов А. Ю. Моисеева К.М.	
ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ БИБЛИОТЕКИ ФЛЕЙМЛЕТ-РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДИФФУЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ТРАКТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ГОРЕЛКИ	240
Красинский Д.В.	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖИДКОСТНОЙ ЗАВЕСЫ ДЛЯ ЭКРАНИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ОЧАГА ВОЗГОРАНИЯ В ПОМЕЩЕНИИ	241
Кузнецов Г.В. Волков Р.С. Жданова А.О. Свириденко А.С. Стрижак П.А.	
СКОРОСТНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КАТАЛИТИЧЕСКОМ ОКИСЛЕНИИ Н ₂	242
Леманов В.В. Лукашов В.В. Шаров К.А.	
ВЛИЯНИЕ ДЕТОНАЦИИ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТУШЕНИЯ ОЧАГА ГОРЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ	243
Лобода Е.Л. Агафонцев М.В. Старосельцева А.А.	
ВЛИЯНИЕ ДОЛИ ДРЕВЕСИНЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГОРЮЧИХ КОМПОНЕНТ В СИНТЕЗ-ГАЗЕ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ В СМЕСИ С ТОРФОМ	244
Мисюкова А.Д. Янковский С.А. Берикболов А.К.	
СТРУКТУРА ФРОНТА ПЛАМЕНИ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПРИ ТЕПЛООТДАЧЕ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	245
Моисеева К.М. Кантарбаева А.И.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ АЭРОВЗВЕСИ СМЕСИ ПОРОШКОВ БОРА И АЛЮМИНИЯ	246
Моисеева К.М. Романий Е.И.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА УСКОРЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОНИЧЕСКОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ ЭТАНОЛА В ГАЗОКАПЕЛЬНОЙ СРЕДЕ.....	247
Пономарев А.А. Мулляджанов Р.И. Дулин В.М.	
ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ СМЕСЕВЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ СВЕТЛЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	248
Романов Д.С. Вершинина К.Ю. Дорохов В.В. Стрижак П.А.	

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАМЕНИ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ПЛОСКОЙ ОХЛАЖДЕННОЙ ПРЕГРАДОЙ С УЧЕТОМ ДЕТАЛЬНОЙ КИНЕТИКИ	249
Сластная Д.А. Хребтов М.Ю. Мулляджанов Р.И. Дулин В.М.	
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАКЕЛА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ДВУХ СТРУЙ ВОДОРОДА	250
Тамбовцев А.С. Козлов В.В. Литвиненко Ю.А. Литвиненко М.В. Шамаков А. Г.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ БУНЗЕНА В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	251
Толстогузов Р.В.	
ГОМОГЕННОЕ ГОРЕНИЕ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В СЛАБОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	252
Тупикин А.В.	
СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАЗМОЙ ОПТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ГОМОГЕННОГО ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ИСТЕЧЕНИИ В АТМОСФЕРУ	253
Тупикин А.В. Третьяков П.К.	
ОКИСЛЕНИЕ КАРБАМИДА В ВОДОКИСЛОРОДНОМ ФЛЮИДЕ	254
Шишкин А.В. Алехин С.А. Сокол М.Я. Востриков А.А. Федяева О.Н.	
СЕКЦИЯ 7 Теплофизические проблемы энергетики, энергоэффективность и энергосбережение	255
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОЧНОГО ГАЗИФИКАТОРА БИОМАССЫ	256
Абаимов Н.А, Рыжков А.Ф.	
ПОСТТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПО КОДУ КОРСАР/ГП ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ПОТЕРИ ОХЛАЖДЕНИЯ БАСЕЙНА ВЫДЕРЖКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	257
Акименкова Е.Ю. Мойсин Д.Н. Степанов О.Е.	
ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПО ВЫБОРУ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ КОНТУРА ЦИРКУЛЯЦИИ И ПАРОГЕНЕРАТОРА НОВОГО ВОДО-ВОДЯНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО РЕАКТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ ВВЭР-И	258
Бедрегдинов М.М. Быков М.А. Следков Р.М. Степанов О.Е.	
ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ ВОЗДУХООБМЕНА ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ НА ТЕПЛОВОЙ И ДИФфуЗИОННЫЙ РЕЖИМ В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ	259
Борисов Б.В. Кузнецов Г.В. Максимов В.И. Нагорнова Т.А. Салагаев С.О. Салихов Ф.Ю.	
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНДИЦИОНЕРА ПОТОКА СО ЗВУКООТРАЖАЮЩИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ	260
Валеев А.А. Душин Н.С. Душина О.А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ	261
Вершинина Ю.В. Дедов А.В.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВОГО ВИХРЯ С ПОМОЩЬЮ PIV МЕТОДА И АКУСТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	262
Гореликов Е.Ю, Литвинов И.В, Окулов В.Л.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПЫЛЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ	263
Горшков А.С. Гвоздяков Д.В. Зенков А.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СУТОЧНОМ ЦИКЛЕ АДсорбЦИОННОГО ЗАПАСАНИЯ ТЕПЛА: СТАДИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА	264
Грекова А.Д. Стрелова С.В. Соловьева М.В. Токарев М.М.	
ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ДЛЯ РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТУПЕНИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ	265
Грибин В.Г. Андрианов Д.М. Макаров А.Ю. Попов В.В. Тищенко В.А. Тищенко А.А.	
АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТЕНА НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ	266
Дектерев Д.А. Дектерев А.А. Дектерев Ар.А. Вавилов Д.В.	
ПРОИЗВОДСТВО ЖИДКОГО ЛЬДА В ГЕНЕРАТОРЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА	267
Егорова А.И. Рябкин С.С. Кротов А.С. Жердев А.А.	
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АММИАКА В ТЕПЛОВЫХ НАСОСАХ	268
Елистратов С.Л. Сеськин И.Н.	
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ И ИХ ФРАКЦИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ПИРОЛИЗА РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ	269
Калтаев А.Ж.. Ларионов К.Б.. Губин В.Е.	
ЗАМЕЧАНИЯ К ВЫБОРУ КОНЦЕПЦИИ ВИХРЕВОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА ТВЕРДОГО СЫРЬЯ	270
Костюнин В.В. Потапов В.Н. Костюнина Т.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ НЕФТЯНОГО КОКСА	271
Кузнецов А. В.	

ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КРУПНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	272
Кузнецов Г.В. Кравченко Е.В.	
ИНИЦИАЦИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИН В ЗАДАЧАХ ПЕТРОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....	273
Ланин В.Н. Черный С.Г.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ БОРНОЙ КИСЛОТЫ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВВЭР.....	274
Лебедев А.А. Морозов А.В. Сахипгареев А.Р. Шлепки А.С.	
ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ФАЗОИЗМЕНЯЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПРИ НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ	275
Летушко В.Н. Низовцев М.И. Стерлягов А.Н.	
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В МОДЕЛИ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ ТОПЛИВНОЙ КАССЕТЫ.....	276
Лобанов П.Д. Светоносов А.И.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА	277
Мальцев К.И. Гиль А.В. Воронцова Е.С. Абрамов Н.В. Пузырев С.А.	
КОМБИНИРОВАННЫЙ ПРЯМОТОЧНЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ: УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ СТРУКТУРЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕАЛИЗАЦИИ.....	278
Матвеев С.А. Савелова К.Э. Чернышов М.В.	
ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПОЛОСТИ НАД РАСПЛАВОМ	279
Мельников И.А. Шмельков Г.Б. Голубев М.А. Великанов А.В.	
ЗАВИСИМОСТЬ МОЩНОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЦЕВОЙ СИСТЕМЫ КУЭТТА-ТЭЙЛора	280
Миськив Н.Б. Назаров А.Д. Серов А.Ф. Мамонов В.Н. Терехов В.И.	
ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ БРОМИСТОЛИТИЕВЫХ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ (АБТТ) ПОВЫШАЮЩЕГО ТИПА В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С УТИЛИЗАЦИЕЙ ТЕПЛА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	281
Мухин Д.Г. Степанов К.И. Елистратов С.Л.	
СЖИГАНИЕ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ХОЛОДНЫМ ВОЗДУХОМ	282
Мухина М.А. Копьев Е.П. Шадрин Е.Ю.	
ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗДАНИЯХ С ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ.....	283
Низовцев М.И. Стерлягов А.Н.	
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ «ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ» ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЗПА	284
Николаева А.В. Астахов В.В. Литышев А.В. Пантюшин С.И.	
ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ «НАТРИЙ-НАТРИЙ» ПЕРСПЕКТИВНОГО РЕАКТОРА БН.....	285
Пахолков В.В. Низамудинов В.Р. Дмитриева И.В. Фадеев И.Д. Рогожкин С.А. Сметанин Т.Р.	
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИ ТЕПЛООБМЕНЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ В ТРУБАХ РАЗНОГО ДИАМЕТРА.....	286
Печенегов Ю.Я. Косов В.А. Косов М.А.	
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ.....	287
Половников В.Ю. Шелемехова С.Д.	
ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ НА ОСНОВЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ	288
Савицкий А.Г.	
СЖИГАНИЕ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ ВИХРЕВОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ.....	289
Садкин И.С. Шадрин Е.Ю. Копьев Е.П. Мухина М.А.	
НЕНУЛЕВЫЕ ВЫБРОСЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ НА УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ С «НУЛЕВЫМИ» ВЫБРОСАМИ.....	290
Садкин И.С. Щинников П.А.	
СВЧ-ПИРОЛИЗ ОТХОДА ПЕРЕРАБОТКИ КЕДРОВОГО ОРЕХА В ВЫСОКОКАЛОРИЙНЫЙ ГАЗ	291
Табакаев Р.Б. Калинин И.	
АГЛОМЕРИРОВАНИЕ И РАЗДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ СУСПЕНЗИЙ ПРИ СОУДАРЕНИИ КАПЕЛЬ И ЧАСТИЦ	292
Ткаченко П.П. Стрижак П.А.	
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОГО ОСТАТКА ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ	293
Ушаков К.Ю. Горина В.З. Богомолов А.Р.	
ОСОБЕННОСТИ ОКИСЛЕНИЯ СВИНЦА ВОДОКИСЛОРОДНЫМ ФЛОИДОМ.....	294
Федяева О.Н. Гребеников А.П. Востриков А.А.	

ГАЗИФИКАЦИЯ ОТХОДОВ БИОМАССЫ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЕ.....	295
Федяева О.Н. Морозов С.В. Востриков А.А.	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ УГЛЯ В ТОПКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА НА УСКП	296
Фоменко Н.Е. Прохоров В.Б. Фоменко М.В.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ДВУХТОПЛИВНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОДОРОДОМ.....	297
Фомин П.А. Троцюк А.В. Тетервова И.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РЕКУПЕРАТОРА ПАРОКОМПРЕССИОННОЙ УСТАНОВКИ НА РАЗЛИЧНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛАХ	298
Хисматуллин Р.М. Ермаков А.М. Салахов Р.Р.	
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ С «НУЛЕВЫМИ» ВЫБРОСАМИ	299
Щинников П.А.	

СЕКЦИЯ 8 Теплофизика микро- и наносистем..... 300

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЛЮОРОФОРОВ НА СВРАЧИВАНИЕ БЕЛКОВ В FRET-ЭКСПЕРИМЕНТАХ.....	301
Андрющенко В.А. Чекмарев С.Ф.	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	302
Андрющенко В.А. Артишевский К.В. Смовж Д.В.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КИПЕНИЯ	303
Быковская Е.Ф. Зайцев Д.В.	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ФИЛЬТРА СИНХРОТРОНА «СКИФ» С ТОЛЩИНОЙ АЛМАЗНОГО СТЕКЛА 0.2-1.0 ММ.....	304
Винокуров В.А. Винокуров В.В. Кабов О.А. Пуховой М.В.	
ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ «ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ» НА КАПИЛЛЯРНОЕ ВСАСЫВАНИЕ.....	305
Володин О.А. Сердюков В.С. Вячеславова Е.А.	
ДВУМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ – ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ	306
Дмитриев А. С. Клименко А. В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕЛЕТА МИКРОКАПЕЛЬ НАД ЛИНИЕЙ КОНТАКТА В ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ, НАГРЕВАЕМОЙ СНИЗУ	307
Кириченко Е.О. Кириченко Д.П. Зайцев Д.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ В Т-МИКРОКАНАЛЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОТНОШЕНИЯ РАСХОДОВ	308
Кравцова А.Ю. Кашкарова М.В.	
ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПУЛЬСАЦИЙ ЖИДКОСТИ НА УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В МИНИКАНАЛЕ	309
Литвинцева А.А. Чеверда В.В.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДОВ ВОДЫ И ВОЗДУХА НА ПРОЦЕСС КИПЕНИЯ ЖИДКОЙ ПЛЁНКИ, УВЛЕКАЕМОЙ ПОТОКОМ ГАЗА.....	310
Лобасов А.С. Минаков А.В.	
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЛИЧИЯ УСЛОВИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ НА СТЕНКАХ Т-ОБРАЗНОГО МИКРОКАНАЛА НА РЕЖИМЫ СМЕШЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ НАЧАЛЬНЫМИ ТЕМПЕРАТУРАМИ	311
Лобасов А.С. Минаков А.В. Рудяк В.Я.	
ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ SDS НА ОБРАЗОВАНИЕ ГИДРАТА УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В КОЛЛОИДНОМ РАСТВОРЕ ВОДА + SDS + SiO ₂	312
Мелешкин А.В. Марсанов Н.В. Щемелева Е.Е.	
КИНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕЧЕНИЯ ВОКРУГ ЛЕВИТИРУЮЩЕЙ МИКРОКАПЛИ	313
Морозов А.А. Зайцев Д.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ НАНОЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВОДЫ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ	314
Морозова М.А. Осипов А.А. Максимовский Е.А. Зайковский А.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СЛИЯНИИ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА НАГРЕВАЕМОЙ ТОНКОЙ ФОЛЬГЕ.....	315
Мурадов Э.Б. Чеверда В.В.	
ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ БИФИЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ НА ОСАЖДЕНИЕ КОЛЛОИДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЛИ НАНОЖИДКОСТИ.....	316
Науменко А.Б. Иванова А.А. Миськив Н.Б. Старинский С.В. Старинская Е.М.	

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА НАГРЕВАТЕЛЯ НА КРИТИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК В ПЛОСКИХ МИКРОКАНАЛАХ С ИНТЕНСИВНЫМ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ НАГРЕВОМ	317
Пуховой М.В. Белослудцев В.В. Зайцев Д.В.	
ОСАЖДЕНИЕ ПРОЗРАЧНЫХ ПОКРЫТИЙ Al_2O_3 С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ СМАЧИВАНИЯ МЕТОДОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ АЛЮМИНИЯ В ФОНОВОМ КИСЛОРОДЕ	318
Родионов А.А. Мельник А.В. Суляева В.С. Шухов Ю.Г. Васильев М.М. Старинский С.В.	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИИ НАНОЖИДКОСТЕЙ	319
Рудяк В.Я.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ ЗОЛОТА НА ЛАЗЕРНУЮ МЕТАЛЛ- ИНДУЦИРОВАННУЮ КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ АМОРФНОГО СУБОКСИДА КРЕМНИЯ	320
Самохвалов Ф.А. Васильев М.М. Родионов А.А. Баранов Е.А. Старинский С.В.	
РАЗМЕРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ, УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦЫ СЕРЕБРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ “ПОГРУЖЕННОГО АТОМА”	321
Цыдыпов Д.Г. Номоев А.В. Гармаев Б.З.	
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА НА КОНДЕНСАЦИОННЫЙ РОСТ МИКРОКАПЕЛЬ ЛЕВИТИРУЮЩИХ НАД ТОНКИМ СЛОЕМ ЖИДКОСТИ	322
Шатекова А.И. Зайцев Д.В.	

СЕКЦИЯ 9 Теплофизические свойства веществ и лучистый теплообмен 323

ПЕРЕНОСНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХЛЕГКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ И БИОРАЗЛАГАЕМЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ	324
Агажанов А.Ш. Хайрулин А.Р. Абдуллаев Р.Н. Самошкин Д.А. Козловский Ю.М.	
КРИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИМЕТИЛОВЫХ ЭФИРОВ ЭТИЛЕНГЛИКОЛЕЙ – КОМПОНЕНТОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ CO_2	325
Богатищева Н.С. Попов А.П. Никитин Е.Д.	
ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ	326
Дулин М.Н.	
МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ВОЛЬФРАМА В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ 800 К ДО 2800 К	327
Захаров Ю.А. Гоц С.С. Бахтизин Р.З. Шарипов Т.И.	
СИНТЕЗ КОМПОЗИТА В УСЛОВИЯХ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА	328
Князева А.Г.	
МОЛЯРНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ И ТОЛЩИНА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ	329
Кутуев Р.А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ С ОПЛАВЛЕНИЕМ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ С УЧЕТОМ ДВУХ ТОЧЕК КЮРИ	330
Лепешкин А.Р. Кондрашов С.С. Федин М.А. Кувалдин А.Б. Федина С.А.	
ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ	331
Лепешкин А.Р.	
МОНОКРИСТАЛЛЫ ДИМОЛИБДАТОВ И ДИВОЛЬФРАМАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ: РОСТ КРИСТАЛЛОВ, ЭНТАЛЬПИИ, ТЕПЛОЕМКОСТЬ	332
Мацкевич Н.И. Семерикова А.Н. Самошкин Д.А. Станкус С.В. Григорьева В.Д. Трифонов В.А. Кочелаков Д.В. Лукьянова С.А. Шлегель В.Н. Кузнецов В.А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОБАЛЬТИТА ВИСМУТА, ЗАМЕЩЕННОГО ДИСПРОЗИЕМ	333
Мацкевич Н.И. Семерикова А.Н. Самошкин Д.А. Станкус С.В. Ткачев Е.Н. Зайцев В.П. Новиков А.Ю. Федоров А.А.	
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКИХ СМЕСЕЙ. РОЛЬ РАССЕЯНИЯ ФОНОНОВ НА ПРИМЕСЯХ	334
Мелких А.В. Скрипов П.В.	
ТЕПЛОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАСТВОРОВ ГЛИКОЛЬ-ВОДА И ГЛИКОЛЬ-ГЛИКОЛЬ	335
Поволоцкий И.И. Волосников Д.В. Скрипов П.В.	
РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ДВУХФАЗНОЙ ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ СРЕДЕ С ПОГЛОЩАЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГАЗОМ	336
Слепцов С.Д. Саввинова Н.А.	
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ ЭКОЛОГИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	337
Солодовников С.Ф. Игуменов И.К. Шутилов Р.А. Лукашов В.В.	
КАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Li_2Ca	338
Хайрулин А.Р. Самошкин Д.А. Станкус С.В.	

СЕКЦИЯ 10 Фундаментальные основы расчёта и принципов построения энергетических систем, основанных на эффекте сверхпроводимости.....	339
ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКСИАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ	340
Боршев Н.О.	
ДИНАМИКА ДВОЙНЫХ ПРИПОДНЯТЫХ СТРУЙ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ.....	341
Добросельский К.Г.	
КРИЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООТДАЧИ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ ПОЛЕЙ МАССОВЫХ СИЛ	342
Жуков В.Е. Павленко А.Н. Мезенцева Н.Н.	
ПЛОТНОСТЬ И ТЕПЛОЕ РАСШИРЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ТО-29-2.....	343
Козловский Ю.М. Станкус С.В.	
ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ КИПЕНИЯ АЗОТА НА МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЯХ	344
Кузнецов Д.В. Павленко А.Н.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ.....	345
Лепешкин А.Р.	
КАЛОРИЧЕСКИЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	346
Самочкин Д.А. Козловский Ю.М. Агажанов А.Ш. Станкус С.В.	

Авторский указатель

- Kosar A. 217
 Абдулагатов И.М. 213
 Абдуллаев Р.Н. 324
 Абед А.Х. 119
 Абрамов Н.В. 277
 Агажанов А.Ш. 324, 346
 Агафонцев М.В. 227, 243
 Айвазян Г.Е. 208
 Акашев А.А. 120
 Акименкова Е.Ю. 257
 Аксёнов А.А. 121
 Аксянов Р.А. 210
 Алексеев Анд.П. 215
 Алексеев М.В. 149
 Алексеенко С.В. 228
 Алехин С.А. 254
 Алипченков В.М. 40, 52
 Алиферов А.И. 4
 Алпацкий Н.С. 83, 104, 106
 Андреев С.Н. 203
 Андрианов Д.М. 265
 Андрющенко В.А. 301, 302
 Анисимова М.А. 178, 179
 Антонов Д.В. 167, 180
 Аньшаков А.С. 4, 228
 Арбузов В.А. 41
 Арбузов Э.В. 41
 Артемов В.И. 64, 225
 Артишевский К.В. 302
 Архипов В.А. 122, 123, 124, 125
 Астахов В.В. 284
 Ахметзянов Т.Р. 213
 Ашихмин А.Е. 126
 Баранов Е.А. 23, 320
 Бардаханов С.П. 16, 32, 34
 Барсуков А.В. 84
 Барткус Г.В. 127
 Басалаев С.А. 122, 123, 124
 Бахтизин Р.З. 327
 Бедретдинов М.М. 258
 Белослудцев В.В. 317
 Беляков Н.Р. 232
 Бердников В.С. 65
 Берикболов А.К. 244
 Бильский А.В. 204
 Блель В. 140
 Бобылев П.Г. 181, 207
 Богатищева Н.С. 188, 325
 Богомоллов А.Р. 293
 Бойко А.В. 85, 87, 106
 Бондарева Н.С. 42
 Бондарь Е.А. 21, 24, 37
 Борейшо А.С. 128
 Борисов Б.В. 259
 Бородин С.Л. 168
 Бородулин В.И. 85, 88, 89
 Борщев Н.О. 340
 Босняков С.М. 43
 Брестер А.Е. 182
 Брызгалов К.В. 67, 111
 Быков М.А. 258
 Быков Н.Ю. 5, 6
 Быковская Е.Ф. 211, 303
 Быковский Ф.А. 109
 Вавилов Д.В. 266
 Валеев А.А. 260
 Ванькова О.С. 90
 Васильев А.А. 230
 Васильев В.А. 230
 Васильев М.М. 33
 Васильев М.М. 129, 164, 318, 320
 Васнёв И.Р. 45
 Васюткин С.А. 130
 Ващенко П.В. 24
 Ведерников Е.Ф. 109
 Великанов А.В. 279
 Вершинина К.Ю. 248
 Вершинина Ю.В. 261
 Виноградов А.В. 220
 Виноградов В.Е. 183
 Виноградов Д.А. 184
 Виноградова М.Р. 233
 Винокуров В.А. 44, 304
 Винокуров В.В. 44, 304
 Витовский О.В. 46
 Владимиров В.Ю. 185
 Владыко И.В. 47
 Вожаков И.С. 131
 Волков Р.С. 186, 241
 Володин О.А. 133, 159, 305
 Волосников Д.В. 209, 335
 Воронцова Е.С. 277
 Востриков А.А. 254, 294, 295
 Вяземская И.И. 187
 Вячеславова Е.А. 305
 Гаврилов А.А. 74
 Гаврилова Т.Е. 56, 57
 Галкин Д.А. 188, 189
 Гапоненко В.Р. 16, 32, 34
 Гармаев Б.З. 321
 Гасенко О.А. 9
 Гатапова Е.Я. 190
 Гвоздяков Д.В. 263
 Генералов Д.А. 237
 Герасимов А.С. 91
 Гетман П.В. 92
 Гешев П.И. 132
 Гиль А.В. 277
 Глазков В.В. 184
 Гобызов О.А. 48, 204
 Гогонин И.И. 133
 Голубев М.А. 279
 Горбачев М.В. 219
 Горбачев Ю.Е. 5, 7
 Гордиенко М.Р. 49
 Гореликова А.Е. 134
 Горина В.З. 293
 Горшков А.С. 263
 Гоц С.С. 327
 Гребенников А.П. 294
 Грекова А.Д. 264
 Грибин В.Г. 265
 Григорьева В.Д. 332
 Гришаев Д.А. 135
 Грудцын Я.В. 40
 Груздь С.А. 136
 Губайдуллин Д.А. 137
 Губин В.Е. 269
 Гузей Д.В. 142, 153
 Гусаков А.А. 72
 Давыдов Д.А. 50, 51
 Дедов А.В. 192, 197, 261
 Дектерев А.А. 174, 231, 266
 Дектерев Ар.А. 231, 266
 Дектерев Д.А. 266
 Делов М.И. 191
 Дементьев Ю.А. 138
 Демидов А.С. 192
 Демидов Д.А. 99
 Держо О.Г. 139
 Деринг Е.Д. 8, 10, 14
 Джгамадзе Г.Т. 128
 Джентрик К. 140
 Димов С.В. 9, 162
 Дмитриев А.С. 306
 Дмитриева И.В. 285
 Добросельский К.Г. 341
 Долгих В.В. 180
 Долгих В.Д. 232, 233
 Домаров П.В. 4, 228
 Дорохов В.В. 248
 Дроздова Е.А. 121
 Дубнищев Ю.Н. 41
 Дубровин К.А. 8, 10, 14, 175
 Дулин В.М. 54, 112, 247, 249
 Дулин М.Н. 11, 326
 Душин Н.С. 260
 Душина О.А. 260
 Дьяченко А.Ю. 114, 115
 Евдокименко И.А. 140
 Егорова А.И. 267
 Елистратов С.Л. 268, 281
 Емельянов А.А. 12, 13
 Ермаков А.М. 298
 Есипов Д.В. 58, 141
 Ефименко Д.Б. 33
 Жаховский В.В. 198
 Жданова А.О. 241
 Желнов Ю.В. 233
 Жердев А.А. 267
 Жерибор М.О. 169
 Жигарев В.А. 22, 142, 150, 153
 Жидков Д.А. 212
 Жлуктов С.В. 121
 Жуков В.Е. 193, 342
 Жуков В.И. 182, 223
 Зайковский А.В. 314
 Зайнулина Э.Р. 194
 Зайцев В.П. 333

- Зайцев Д.В. 224, 303, 307, 313, 317, 322
 Замураев В.П. 234
 Замчий А.О. 23
 Занин Б.Ю. 83, 104, 106
 Запрягаев В.И. 43
 Зарвин А.Е. 8, 10, 14, 35, 175
 Зарипов Д.И. 102
 Захаренков А.В. 192, 197
 Захаров Ю.А. 327
 Зверков И.Д. 20, 93
 Здорников С.А. 143
 Зезюлин И.В. 121
 Зенков А.В. 263
 Знаменская И.А. 15
 Зобов К.В. 16, 34
 Золоторёв Н.Н. 124
 Золотухин А.В. 94
 Золотухина О.С. 41
 Зорькина А.И. 195
 Зубков Н.Н. 92
 Иванов А.В. 85, 88, 89
 Иванов С.А. 233
 Иванова А.А. 316
 Иванова С.В. 153
 Ивочкин Ю.П. 144
 Игольников А.А. 196
 Игуменов И.К. 235, 337
 Ильясова О.Х. 52
 Исаев С.А. 95, 96
 Исаенков С.В. 143
 Кабардин И.К. 49
 Кабов О.А. 195, 211, 224, 304
 Кавун И.Н. 43
 Какаулин С.В. 49
 Калинин Е.И. 66
 Калинина А.П. 234
 Калинин И. 291
 Калтаев А.Ж. 269
 Каляда В.В. 8, 10, 14, 35, 175
 Кантарбаева А.И. 245
 Каприлевская В.С. 83, 104
 Карпенко А.А. 130
 Карпов Д.А. 237
 Катаев А.И. 206
 Катасонов М.М. 108, 236
 Каун Ю.В. 97
 Качанов Ю.С. 88, 89
 Кашинский О.Н. 53, 134
 Каширин В.С. 121
 Кашкарова М.В. 308
 Кашковский А.В. 17, 24
 Керимбекова С.А. 186
 Кириловский С.В. 87, 98, 154
 Кириченко Д.П. 307
 Кириченко Е.О. 307
 Кирчанова Е.Е. 54
 Кислицын С.А. 44, 55
 Клементьев А.А. 203
 Клименко А.В. 2
 Климова В.А. 119
 Князев С.А. 72
 Князева А.Г. 178, 179, 328
 Ковальногов В.Н. 99, 237
 Коверда В.П. 220
 Ковешников К.С. 144
 Козлов В.В. 106, 236, 250
 Козлова М.А. 238
 Козловский Ю.М. 324, 343, 346
 Кольшкин Л.М. 145
 Комов А.Т. 192, 197
 Кондрашов С.С. 330
 Константинов В.О. 23
 Конькин А.В. 215
 Копьев Е.П. 282, 289
 Корнилова М.И. 99
 Коробейщиков Н.Г. 18
 Королёв А.А. 17
 Коростелева Е.Н. 178
 Косинов А.Д. 100
 Косов М.А. 286
 Костюнин В.В. 270
 Костюнина Т.В. 270
 Косяков В.А. 146
 Котова Е.В. 56, 57
 Кочелаков Д.В. 332
 Кравцова А.Ю. 148, 164, 308
 Кравченко Е.В. 272
 Крайнов А.Ю. 239
 Красильников Д.Н. 50, 51
 Красинский Д.В. 240
 Краснолуцкий С.Л. 19
 Кривилев М.Д. 136
 Кротов А.С. 267
 Крупнов А.А. 21
 Крюков А.В. 20, 93
 Крюков А.П. 198
 Кубриков К.Г. 144
 Кувалдин А.Б. 330
 Кудинов В.А. 56, 57, 232
 Кузнецов А.В. 271
 Кузнецов В.А. 231, 332
 Кузнецов В.В. 81, 127, 147, 199, 222
 Кузнецов Г.В. 218, 241, 259, 272
 Кузнецов Д.В. 344
 Кузьменков Д.М. 191
 Куликов В.В. 20
 Кульпанович Г.Т. 114
 Куранаков Д.С. 58
 Курдюмов А.С. 53
 Кутуев Р.А. 329
 Куценко К.В. 191
 Кушнаренко А.В. 36
 Лаврухин А.А. 191
 Лапин В.Н. 273
 Лаптев А.Д. 50
 Ларионов К.Б. 269
 Латкин Д.Ю. 59
 Лебеда К.С. 60, 67, 111
 Лебеда Л.С. 46
 Лебедев А.С. 101, 160
 Лебезов А.А. 274
 Лебига В.А. 95
 Левашов В.Ю. 198
 Левин А.А. 200
 Легран Д. 140
 Лежнев Е.В. 19
 Леманов В.В. 61, 91, 242
 Лепешкин А.Р. 330, 331, 345
 Летущко В.Н. 275
 Ли Х. 62
 Литвиненко В.В. 33
 Литвиненко М.В. 250
 Литвиненко Ю.А. 236, 250
 Литвинов И.В. 113
 Литвинцев А.С. 21, 24
 Литвинцева А.А. 309
 Литышев А.В. 284
 Лобанов П.Д. 140, 276
 Лобасов А.С. 148, 224, 310, 311
 Лобода Е.Л. 227, 243
 Лошкарёва Е.А. 225
 Лукашов В.В. 41, 61, 235, 242, 337
 Лукьянов А.А. 102
 Лукьянов Ан.А. 149
 Лукьянова С.А. 332
 Лунев Н.А. 23
 Лутченко И.И. 107
 Луценко А.В. 227
 Лучинкин Н.А. 63
 Лысакова Е.И. 22, 142, 150, 153
 Лэй Р.А. 210
 Мазо А.Б. 66
 Макаров А.Ю. 265
 Макаров М.В. 64
 Макаров М.С. 46, 219
 Максимов В.И. 259
 Максимовский Е.А. 314
 Малахов И.П. 214, 217
 Мальцев К.И. 277
 Мамонов В.Н. 205, 280
 Марасанов Н.В. 201, 202, 312
 Маркин В.В. 103
 Матвеев С.А. 278
 Мацкевич Н.И. 332, 333
 Медведев В.А. 51
 Мезенцев И.В. 193
 Мезенцева Н.Н. 193, 342
 Мелешкин А.В. 201, 202, 312
 Мелешко Н.В. 233
 Мелихов В.И. 151
 Мелихов О.И. 152
 Мелких А.В. 334
 Мельник А.В. 318
 Мельник Е.А. 83, 104, 106
 Мельников И.А. 279
 Мержоева Л.Р. 130
 Меркулова И.Е. 23
 Мешкова В.Д. 174
 Милешкин М.С. 161
 Минаков А.В. 142, 150, 153, 173, 310, 311
 Минко К.Б. 203, 225
 Миронов С.Г. 154
 Миронова И.Б. 206
 Миськив Н.Б. 47, 205, 216, 280, 316
 Мисюкова А.Д. 244
 Мисюра С.Я. 204

- Митяков В.Ю. 96, 194
 Мищенко Д.А. 85, 105
 Моисеев А.А. 128
 Моисеева К.М. 239, 245, 246
 Мойсин Д.Н. 257
 Молочников В.М. 66
 Молчанова А.Н. 21, 24
 Мордовской А.С. 81, 199
 Морозов А.А. 313
 Морозов А.В. 274
 Морозов В.С. 204
 Морозов С.В. 295
 Морозова М.А. 314
 Мосунова Н.А. 40, 52
 Муляджанов Р.И. 107, 131, 169, 247, 249
 Мурадов Э.Б. 315
 Муратов М.И. 15
 Мухин Д.Г. 281
 Мухина М.А. 282, 289
 Нагорнова Т.А. 259
 Назаров А.Д. 47, 205, 280
 Науменко А.Б. 316
 Наумкин В.С. 46, 60, 67, 111
 Наумов И.В. 172
 Небучинов А.С. 69
 Низамутдинов В.Р. 285
 Низовцев М.И. 275, 283
 Никитин Е.Д. 325
 Никифоров И.В. 66
 Николаев И.О. 178
 Николаева А.В. 284
 Никулин А.С. 151
 Никущенко Д.В. 95
 Ничик М.Ю. 112
 Новиков А.Ю. 333
 Номоев А.В. 321
 Окулов В.Л. 262
 Осипов А.А. 314
 Остапченко А.Е. 221
 Павленко А.М. 83, 104, 106
 Павленко А.Н. 159, 182, 206, 223, 342, 344
 Павлов А.В. 181, 207
 Павлов П.А. 183
 Палагин А.В. 40
 Палкин Е.В. 107
 Пантелеев С.А. 48, 102
 Пантюшин С.И. 284
 Пахолков В.В. 285
 Пахомов М.А. 134, 155
 Пашин А.В. 25
 Пашкова Н.Д. 66
 Перепечко Л.Н. 26
 Перфильева К.Г. 122, 123, 124
 Петкевич И.Г. 59
 Петров О.Ф. 33
 Петрова А.В. 27
 Петрова А.Г. 70
 Петухов В.Г. 28
 Печенегов Ю.Я. 286
 Печёркин Н.И. 159
 Пещенюк Ю.А. 208
 Пинаев А.В. 156
 Пинаев В.А. 12
 Пинаев П.А. 156
 Пискунова А.Е. 157
 Питеримова М.В. 100
 Платонов Д.В. 71
 Плотников Л.В. 50, 51
 Плотников М.Ю. 12, 13
 Поволоцкий И.И. 209, 335
 Погосбемян М.Ю. 21
 Поливанов П.А. 103
 Половников В.Ю. 287
 Полякова В.И. 49
 Полянская О.Н. 63
 Пономарев А.А. 247
 Поплавская Т.В. 87, 98, 154
 Попов А.П. 325
 Попов В.В. 265
 Попов Г.А. 28
 Попов И.А. 92, 210
 Потапов В.Н. 270
 Правдина М.Х. 49
 Приходько В.Г. 29
 Прохоров В.Б. 296
 Пряжников А.И. 153, 173
 Пряжников М.И. 153
 Пузина Ю.Ю. 198
 Пузырев С.А. 277
 Пуховой М.В. 211, 304, 317
 Пухначев В.В. 70
 Пушкарев А.В. 212
 Радзюк А.Ю. 158
 Разуванов Н.Г. 63
 Ребров А.К. 12
 Рейно В.В. 227
 Решетников А.В. 120
 Ригин В.Е. 78
 Рогожкин С.А. 285
 Роде А.А. 121
 Родионов А.А. 318, 320
 Романий Е.И. 246
 Романов Д.С. 248
 Роньшин Ф.В. 138, 195
 Рудяк В.Я. 19, 311, 319
 Рьжков А.Ф. 256
 Рябикин С.С. 267
 Рябов М.Н. 204
 Саввинова Н.А. 336
 Савелова К.Э. 278
 Савельев В.Л. 30
 Савин А.В. 128
 Савицкий А.Г. 288
 Садкин И.С. 289, 290
 Садовский И.А. 108
 Сажин С.С. 180
 Сазонова М.Л. 121
 Салагаев С.О. 259
 Салахов Р.Р. 298
 Салех Башар 152
 Салихов И.З. 213
 Салихов Ф.Ю. 259
 Сальников М.В. 31, 221
 Самохвалов Ф.А. 320
 Самошкин Д.А. 324, 332, 333, 338, 346
 Самсонов А.Н. 109
 Самсонов Д.С. 136
 Сапожников С.З. 96, 181, 207
 Сарсембенов Е. 110
 Сафаров А.С. 165, 200
 Сафонов А.И. 27
 Сахипгареев А.Р. 274
 Сахнов А.Ю. 60, 67, 111, 159
 Светоносов А.И. 276
 Свириденко А.С. 241
 Северин А.С. 160
 Селезнева М.Д. 72
 Семерикова А.Н. 332, 333
 Семионов В.В. 161
 Сендир Е.А. 205
 Сентябрьев А.В. 71
 Сергеев Е.М. 161
 Сердюков В.С. 214, 217, 305
 Серёжкин Л.Н. 225
 Серов А.Ф. 205, 280
 Сероштанов В.В. 72, 96
 Сержиков А.В. 215
 Сеськин И.Н. 268
 Си-Ахмед Э-К. 140
 Сибиряков Н.Е. 162
 Сидоренко А.А. 98
 Сиковский Д.Ф. 73
 Симонов Е.В. 163
 Синкевич О.А. 144
 Синявин А.А. 76
 Скоков В.Н. 120
 Скоробогатова А.Д. 22, 142, 150
 Скороспелов В.А. 78
 Скрипкин С.Г. 71, 164
 Скрипов П.В. 189, 196, 209, 334, 335
 Сладкая Д.А. 249
 Следков Р.М. 258
 Следнев В.А. 50
 Слепцов С.Д. 336
 Сметанин Т.Р. 285
 Смирнов Н.И. 216
 Смирнов П.Г. 128
 Смирных М.Д. 51
 Смывж Д.В. 302
 Смутьский Я.И. 114, 115
 Сокол М.Я. 254
 Соколова А.Д. 197
 Соловьева М.В. 264
 Солодовников С.Ф. 337
 Сорокин М.И. 101
 Станкус С.В. 332, 333, 338, 343, 346
 Старинская Е.М. 205, 216, 316
 Старинский С.В. 129, 164, 216, 316, 318, 320
 Старосельцева А.А. 243
 Степанов К.И. 281
 Степанов О.Е. 257, 258
 Степанова Ю.С. 210
 Стерлягов А.Н. 275, 283
 Стефанюк Е.В. 57

- Столповский М.В. 168
 Стрелова С.В. 264
 Стрижак П.А. 167, 180, 241, 248, 292
 Строева П.С. 112
 Судаков А.Г. 95
 Суляева В.С. 318
 Суртаев А.С. 47, 214, 217
 Суслов Д.А. 113
 Сухинин Г.И. 31
 Сухорукова Е.Ю. 193
 Сюзаев А.И. 219
 Табакаев Р.Б. 291
 Таиров Э.А. 165
 Тамбовцев А.С. 250
 Тарраф Даниэль 166
 Тепляков И.О. 144, 184
 Терехов В.В. 75, 84, 110, 129
 Терехов В.И. 75, 84, 94, 110, 114, 115, 117, 134, 280
 Тетервова И.В. 297
 Тимофеев П.М. 109
 Тимошенко Н.И. 12, 13, 26
 Тинтулова М.В. 172
 Тихонович В.В. 26
 Тищенко А.А. 265
 Тищенко В.А. 265
 Ткачев Е.Н. 333
 Ткаченко П.П. 292
 Токарев М.М. 264
 Токарев М.П. 48
 Токарев М.Ю. 54
 Толстогузов Р.В. 251
 Томин А.С. 220
 Третьяков П.К. 253
 Трифонов В.А. 332
 Троцюк А.В. 297
 Трубицын К.В. 56, 57
 Трубицына Л.П. 43
 Труфанов Д.Ю. 16, 32, 34
 Тупикин А.В. 253
 Турук П.А. 78
 Тэпфер Е.С. 231
 Усанина А.С. 123, 124, 125
 Устименко А.С. 78
 Ушаков К.Ю. 293
 Фадеев И.Д. 285
 Файзуллин М.З. 220
 Фалеев В.А. 4, 228
 Федин М.А. 330
 Федоренко Р.М. 167
 Федоров А.А. 333
 Федоров В.С. 126
 Федоров Р.В. 99, 237
 Фёдоров С.А. 5, 6
 Федорова Н.Н. 45
 Федорова С.А. 210
 Федосеев А.В. 31, 33, 221
 Федяева О.Н. 254, 294, 295
 Фелимонов С.А. 74
 Филиппов М.В. 75, 110
 Фоменко М.В. 296
 Фоменко Н.Е. 296
 Фомин П.А. 297
 Фроловская О.А. 70
 Фурсенко Р.В. 146
 Хабриев И.Ш. 213
 Хайбуллина А.И. 76, 77
 Хайрулин А.Р. 324, 338
 Хайруллин А.Р. 76, 77
 Хайрутдинов В.Ф. 213
 Хан П.В. 165, 200
 Хартаева Э.Ч. 16, 34
 Хасанов М.К. 168
 Хахалев Ю.А. 99
 Хахалева Л.В. 99
 Хе А.К. 130
 Хисматуллин Р.М. 298
 Хмель С.Я. 185
 Хомутов Н.А. 157
 Хребтов М.Ю. 107, 131, 169, 249
 Художитков В.Э. 14, 35, 175
 Цвелодуб О.Ю. 170
 Цой М.А. 164
 Цыдыпов Д.Г. 321
 Цырюльников И.С. 154
 Чакин И.К. 32
 Чеверда В.В. 309, 315
 Чекмарев С.Ф. 301
 Черданцев А.В. 143
 Черемисин А.А. 171
 Черный С.Г. 121, 166, 273
 Чернышов М.В. 97, 278
 Чехов В.П. 20, 93
 Чинак А.В. 134
 Чиннов Е.А. 138, 161, 185
 Чирков Д.В. 78
 Чохар И.А. 75, 117
 Чумаков Ю.А. 179
 Чупахин А.П. 130
 Чуркин Р.А. 125
 Шадрин Е.Ю. 282, 289
 Шакуров А.В. 79, 145
 Шалаев В.И. 80
 Шаманский В.А. 238
 Шамирзаев А.С. 81, 176, 199, 222
 Шарина И.А. 26
 Шарипов Т.И. 327
 Шарифуллин Б.Р. 172
 Шаров К.А. 61, 115, 242
 Шатекова А.И. 322
 Швецов Д.А. 223
 Шебелев А.В. 173, 224
 Шебелева А.А. 173
 Шелемехова С.Д. 287
 Шеремет М.А. 42
 Шишкин А.В. 254
 Шлегель В.Н. 44, 332
 Шлепкин А.С. 274
 Шмаков А.Г. 236
 Шоев Г.В. 7
 Штелинг В.С. 197
 Шторк С.И. 71
 Шульженко П.Д. 174
 Шурупов В.А. 50
 Шутилов Р.А. 235, 337
 Шухов Ю.Г. 129, 318
 Щеклеин С.Е. 119
 Щелчков А.В. 92
 Щемелева Е.Е. 312
 Щербаков П.П. 197
 Щинников П.А. 290, 299
 Юдин И.Б. 12, 13
 Юдин С.М. 144
 Яворский Н.И. 116
 Яковенко С.Н. 62, 90
 Яковлева В.В. 72
 Ян Лун Н. 117
 Янковский С.А. 244
 Яньков Г.Г. 64, 225
 Ярков Л.В. 37
 Ярыгин В.Н. 29, 38
 Ярыгин И.В. 29
 Яскин А.С. 10, 14, 175

*Мероприятие проведено при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
в рамках Соглашения № 075-15-2021-575,
Сибирского отделения Российской академии наук
и группы компаний «Научные приборы и системы»*

Ответственные за выпуск
*д.ф.-м.н. А.А. Морозов,
И.Б. Юдин*

Подписано в печать 25.08.2023 Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16. Усл. печ. 29,5 л.
Тираж 25 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии «Срочная полиграфия»
ИП Малыгин Алексей Михайлович
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6/1, оф.104
Тел. (383) 217-43-46, 8-913-922-19-07



Алексей Кузьмич Ребров – выдающийся ученый в области физической газодинамики, динамики разреженных газов, теплофизики и вакуумной техники.

Родился 30 июля 1933 г. Окончил Харьковский авиационный институт в 1955 году. Учился в аспирантуре Казанского авиационного института (1957-1960). Кандидат технических наук (1962 г.), тема диссертации: «Исследование теплообмена в разреженном пространстве». С 1961 года работает в Институте теплофизики. С 1966 года заведующий лабораторией разреженных газов. Доктор физико-математических наук (1972 г.), тема диссертации «Исследование расширения газа в среду низкой плотности». В 1990 году избран членом-корреспондентом АН СССР по Отделению проблем машиностроения, механики и процессов управления. В 2000 году избран академиком РАН.

Научная деятельность началась с участия в разработке метода огневого (струйного) бурения скальных пород. Внёс большой вклад в установление закономерностей динамики разреженных газов. Исследования теплообмена при свободной конвекции в разреженных газах отразились в разработке метода расчёта теплового состояния аппаратуры высотных самолетов и теплофизическом обосновании высотной астрофизической обсерватории «Сатурн». Создание в Институте теплофизики уникального вакуумного газодинамического комплекса и исследования газодинамики струй низкой плотности и неравновесных процессов в них (а именно поступательной, вращательной, колебательной релаксации, конденсации, генерации кластеров) позволили обеспечить моделирование струй космических летательных аппаратов, в частности, при их стыковке. Эти же исследования послужили научной базой для разработки экономичных пароструйных насосов с низким обратным потоком паров масел. В последние годы проводит фундаментальные исследования в обоснование различных струйных вакуумных технологий, в частности, газоструйного осаждения и синтеза наноразмерных систем.

Под его руководством подготовлено 32 кандидата наук, 13 из них стали докторами наук, один – академиком.

Организатор крупных международных симпозиумов по динамике разреженных газов в России в 1982 и 2006 г. и ряда всесоюзных и российских конференций. В 2018 г. в Институте теплофизики СО РАН была проведена конференция «XXXIV Сибирский теплофизический семинар», посвященная 85-летию академика А. К. Реброва.

Член международного совещательного комитета симпозиума по динамике разреженных газов, член Российского Национального комитета по теоретической и прикладной механике, член Российского вакуумного общества. Заместитель главного редактора журнала "ПМТФ".

Добра пожелать!