



ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
с элементами научной школы для  
молодых ученых

XXXVIII

СИБИРСКИЙ  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ  
СЕМИНАР,

посвященный 65-летию Института теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе СОРАН

29-31 августа 2022 г.

Новосибирск, Россия

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет

Новосибирский государственный технический университет

Сибирское отделение Российской академии наук

Отделение энергетики, машиностроения, механики и  
процессов управления РАН

Российский национальный комитет по тепломассообмену



N\*

НГТУ



НЭТИ



НКТМ  
РАН



Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
с элементами научной школы для молодых ученых



**XXXVIII**  
**СИБИРСКИЙ**  
**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ**  
**СЕМИНАР,**

посвящённый 65-летию Института теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе СО РАН

29–31 августа 2022  
Новосибирск, Россия

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

Новосибирск 2022

УДК 532:533:534:535:536:537

Сборник содержит доклады Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых учёных XXXVIII «Сибирский теплофизический семинар», посвящённой 65-летию Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, которая проводилась 29–31 августа 2022 года в Новосибирске. Электронная версия – <http://www.itp.nsc.ru/conferences/sts38/files/thesis.pdf>. В сборнике представлены доклады по направлениям: турбулентные течения в однофазных средах, методы управления турбулентностью и интенсификации тепло-массопереноса, процессы переноса при физико-химических превращениях, включая горение, гидродинамика, тепло-массообмен и волновые процессы в многофазных средах, тепло-массообмен при фазовых переходах, теплофизические проблемы энергетики, энергоэффективность и энергосбережение, теплофизика микро- и наносистем, процессы в разреженных газах и плазме, теплофизические свойства веществ и лучистый теплообмен, тепло-массоперенос в технологических процессах, решение экологических проблем, низкоуглеродная энергетика, фундаментальные основы расчета и принципов построения энергетических систем, основанных на эффекте сверхпроводимости, аэрогазодинамика и теплофизика в космических приложениях.

Мероприятие проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2021-575Ю, а также Сибирского отделения Российской академии наук.

#### Организационный комитет

##### Председатель

Маркович Д.М., академик РАН

##### Заместители председателя

Сиковский Д.Ф., к.ф.-м.н.,

Куйбин П.А., д.ф.-м.н.

##### Учёные секретари

Муляджанов Р. И., д.ф.-м.н.

Скрипкин С.Г., к.ф.-м.н.

##### Председатель Технического комитета

Гореликов Е. Ю.

##### Члены Оргкомитета

Батаев А.А., д.т.н.

Бердников В.С., д.ф.-м.н.

Бондарь Е.А., к.ф.-м.н.

Дулин В.М., д.ф.-м.н.

Елистратов С.Л., д.т.н.

Зубова С.В.

Кабов О.А., д.ф.-м.н.

Кашинский О.Н., д.ф.-м.н.

Ковалёв К.Л., д.т.н.

Кузнецов В.В., 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

Пахомов М.А., д.ф.-м.н., проф. РАН

Прибатурин Н.А., чл.-корр. РАН

Станкус С.В., д.ф.-м.н.

Терехов В.В., д.ф.-м.н., проф. РАН

Терехов В.И., д.т.н.

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.

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

##### Председатель

Алексеев С.В., академик РАН

##### Сопредседатели

Алифанов О.М., академик РАН

Байдаков В.Г., д.ф.-м.н.

Большов Л.А., академик РАН

Бурдуков А.П., д.т.н.

Вараксин А.Ю., член-корр. РАН

Васильев А.А., д.ф.-м.н.

Виноградов А.В., 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

Гортышов Ю.Ф., академик АН РТ

Горячева И.Г., академик РАН

Губайдуллин Д.А. член-корр. РАН

Дедов А.В., член-корр. РАН

Драгунов Ю.Г., член-корр. РАН

Дмитриев А.С., д.т.н.

Егоров И.В., член-корр. РАН

Ерманюк Е.В., д.ф.-м.н.

Запрягаев В.И., д.т.н.

Исаев С.А., д.ф.-м.н.

Кедринский В.К., д.ф.-м.н.

Кирдяшкин А.Г., д.ф.-м.н.

Клименко А.В., академик РАН

Козлов В.В., д.ф.-м.н.

Коротеев А.А., академик РАН

Каторгин Б.И., академик РАН

Костюк В.В., академик РАН

Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н.

Левин В.А., академик РАН

Леонтьев А.И., академик РАН

Любимова Т.П., д.ф.-м.н.

Мессерле В.Е., д.т.н.

Мильман О.О., д.т.н.

Михеев Н.И., д.т.н.

Нигматулин Р.И., академик РАН

Окулов В.Л., д.ф.-м.н.

Пенязьков О.Г., академик НАНБ

Петреня Ю.К., член-корр. РАН

Петров О.Ф., академик РАН

Покусав Б.Г., член-корр. РАН

Предтеченский М.Р., академик РАН

Пухначев В.В., член-корр. РАН

Ребров А.К., академик РАН

Рогалёв Н.Д., д.т.н.

Рудяк В.Я., д.ф.-м.н.

Сажин С.С., Prof.

Сапожников С.З., д.т.н.

Смирнов Е.М., д.ф.-м.н.

Стенников В.А., член-корр. РАН

Суржииков С.Т., академик РАН

Тестоедов Н.А. член-корр. РАН

Фаворский О.Н., академик РАН

Филиппов С.П., академик РАН

Фомин В.М., академик РАН

Хомич В.Ю., академик РАН

Шиплюк А.Н., член-корр. РАН

Шмотин Ю.Н., д.т.н.

Якуш С.Е., д.ф.-м.н.

Jiang P.-X., Prof.

Kemal Hanjalić, 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.

УДК 536.41:669.721.5

## ПЛОТНОСТЬ И ТЕПЛОЕ РАСШИРЕНИЕ СПЛАВОВ МАГНИЙ–КАЛЬЦИЙ

Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А., Козловский Ю.М.

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

Сплавы на основе магния являются одними из самых перспективных легких конструкционных материалов. Множество исследовательских работ последних двух десятилетий посвящены поиску различных способов оптимизации их физико-химических свойств. Так, одним из способов упрочнения магниевых сплавов без существенной потери в пластичности является их модификация путем добавления небольшого количества других металлов, к примеру кальция [1–3]. Кроме того, согласно [4], кальций ингибирует воспламенение и окисление расплавленного магния и улучшает коррозионную стойкость магниевых сплавов. Эти и ряд других особенностей делают магний-кальциевые сплавы привлекательными для использования в качестве биосовместимых и биоразлагаемых сплавов [5], сверхлегких конструкционных материалов, анодных материалов [6], абсорбентов водорода [7] и др. Надежные и систематизированные данные по плотности и коэффициентам теплового расширения сплавов Mg–Ca необходимы при конструировании на их основе новых материалов, обладающих оптимальными для использования на практике параметрами, для прогнозирования их физических свойств и для их успешного внедрения в разных областях промышленности.

Дилатометрическим методом и методом просвечивания образцов узким пучком монохроматического гамма-излучения (гамма-метод) выполнены измерения термических свойств эвтектических сплавов магния с кальцием (с содержанием 10,5 и 73 ат. % Ca) и интерметаллического соединения  $Mg_2Ca$  в широком интервале температур твердого и жидкого состояний, включая области плавления-кристаллизации. Исследования плотности и теплового расширения проводились в интервале температур от ~100 К до ~1230 К. Гомогенизация сплавов Mg–Ca и исследование их термических свойств гамма-методом были проведены в герметичных молибденовых ампулах. Операции по приготовлению сплавов и заполнению измерительных ячеек проводились в перчаточном боксе с высокочистым аргоном (99,992 об. %), оснащенный аппаратом электрической дуговой сварки и электронными аналитическими весами.

На основании полученных результатов построены температурные зависимости плотности эвтектических сплавов магния с кальцием (с содержанием 10,5 и 73 ат. % Ca) и интерметаллического соединения  $Mg_2Ca$ , рассчитаны средневзвешенные значения их коэффициентов теплового расширения и скачков плотности при плавлении-кристаллизации. Сравнение построенных в настоящей работе температурных зависимостей плотности приведено на рис. 1. По нашим сведениям, плотность, тепловое расширение и скачки

плотности при плавлении-кристаллизации исследованных сплавов до настоящего времени не измерялись. В связи с этим, полученные в настоящей работе экспериментальные данные являются уникальными и могут быть рекомендованы в качестве справочных.

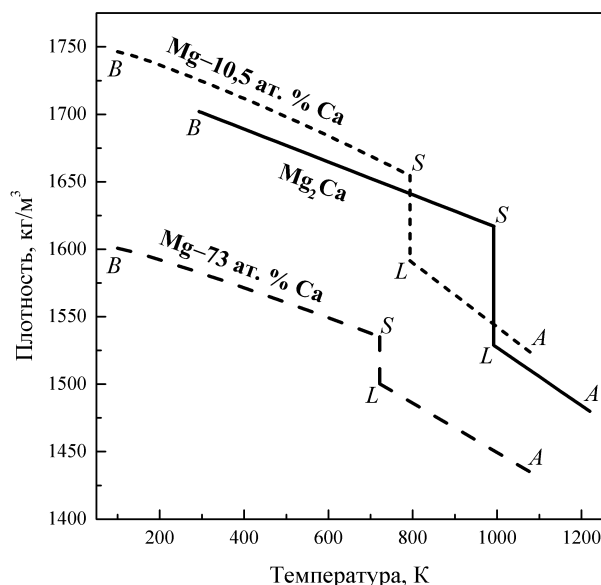


Рис. 1. Температурные зависимости плотности эвтектических сплавов магния с кальцием (с содержанием 10,5 и 73 ат. % Ca) и интерметаллического соединения  $Mg_2Ca$ . BS – твердое состояние, SL – плавление-кристаллизация, LA – жидкое состояние.

## Список литературы:

1. Song G.S., Kral M.V. Characterization of cast Mg–Li–Ca alloys// Mater. Charact. 2005. Vol. 54. No. 4-5. P. 279-286.
2. Wang T., Wu R., Zhang M., Li L., Zhang J., Li J. Effects of calcium on the microstructures and tensile properties of Mg-5Li-3Al alloys// Mater. Sci. Eng. 2011. Vol. 528. No. 18. P. 5678-5684.
3. 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// J. Alloys Compd. 2016. Vol. 664. P. 85-91.
4. Sakamoto M., Akiyama S., Ogi K. Suppression of ignition and burning of molten Mg alloys by Ca bearing stable oxide film// J. Mater. Sci. Lett. 1997. Vol. 16. No. 12. P. 1048-1050.
5. Li Z., Gu X., Lou S., Zheng Y. The development of binary Mg–Ca alloys for use as biodegradable materials within bone// Biomaterials. 2008. Vol. 29. No. 10. P. 1329-1344.
6. Deng M., Höche D., Lamaka S.V., Snihirova D., Zheludkevich M.L. Mg–Ca binary alloys as anodes for primary Mg–air batteries// J. Power Sources. 2018. Vol. 396. P. 109-118.
7. Terashita N., Akiba E. Hydrogenation properties of CaMg<sub>2</sub> based alloys// Mater. Trans. 2004. Vol. 45. No. 8. P. 2594-2597.

Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского научного фонда  
(проект № 20-79-10025).

УДК 544.452

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

Агафонцев М.В.<sup>1</sup>, Луценко А.В.<sup>1,2</sup>, Лобода Е.Л.<sup>1,2</sup>, Рейно В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,  
634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1

Диффузионный режим горения топлива является одним из наиболее распространенных режимов горения. Он встречается в технических системах при работе газовых турбин, ракетных двигателях и энергетических топках, а также в отопительных приборах бытового назначения, и в перерабатывающей промышленности. Диффузионный режим горения, как правило, реализуется в условиях развитой турбулентности.

Реакции газозаженного горения кислорода и углеводородных топлив характеризуются большим выделением энергии, которая может превышать 2000 К. От температуры реакции также зависит и ее скорость протекания. Известно, что перемещение турбулентных структур в диффузионном пламени приводит к пульсациям температуры в пламени [1], которые происходят с определенной частотой, связанной с размерами и скоростью движения турбулентных структур в пламени.

В [2] утверждается существование взаимосвязи между воздействиями колебаний давления на зону горения и наличия фазового сдвига между колебаниями давления и скоростью горения [3, 4]. Если работа зоны горения при изменении давления положительна, т.е. выполнялся критерий Рэлея, то выделение теплоты должно быть согласовано с колебаниями давления, что в свою очередь приводит к потере устойчивости процесса.

В данной работе представлены результаты исследования горения ряда жидких и газообразных углеводородных топлив при воздействиях на них внешних пульсаций давления малой амплитуды. Для исследований применялись бесконтактные методы ИК термографии.

В качестве горючих материалов рассматривались жидкие углеводороды – бензин, керосин, газообразные – метан. Генератором внешних пульсаций давления служил низкочастотный динамик 25-ГД-26 с мягким подвесом на который подавался синусоидальный сигнал, сформированный генератором сигналов специальной формы Г6-28, предварительно усиленный при помощи усилителя LV 103. Дополнительно температура в пламени контролировалась термопарой типа К для нахождения эффективного коэффициента излучения.

Для анализа размеров высокотемпературных областей, полученных при использовании метода ИК-

термографии, была разработана программа в среде MatLab. Она считывала файл, представляющий из себя изображение формата «.jpg» с разрешением 320×240 pix, преобразовывала его в 8 битную матрицу чисел, где значение элементов матрицы, равные «0» соответствовали черному цвету (холодная область), а «255» – белому (горячая область), и находила количество ненулевых элементов как в строках, так и в столбцах.

В результате работы алгоритма с последовательностью изображений были получены данные о распределении неоднородностей в проекции на координатные оси. Для более детального изучения полученных распределений была произведена оценка толщины ( $l$ ) и высоты ( $h$ ) зоны температурных неоднородностей для рассматриваемых режимов внешних воздействий.

На основании полученных оценок можно сделать вывод, что наличие внешних пульсаций приводит к изменению высоты и толщины области, в которой сосредоточены температурные неоднородности. Так, для бензина можно выделить режим 4,5 Гц, при котором наблюдается максимальная ширина зоны температурных неоднородностей. При характерных частотах 2 Гц и 5,6 Гц, наблюдается резкое уменьшение высоты области температурных неоднородностей. Для керосина, при наличии внешних пульсаций эта область расширяется по горизонтали с увеличением частоты пульсаций давления, а при частоте воздействия 5,8 Гц ширина зоны имеет максимальное значение, однако высота зоны температурных неоднородностей при этом уменьшается. Для газообразного топлива были выявлены пульсации с частотой, близкой к 4 Гц.

### Список литературы:

1. Loboda E.L., Matvienko O.V., Vavilov V.P., Reyno V.V. Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale // *Infrared Phys. Technol.* 2015. V. 72. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.07.001.
2. Афанасьев В.В., Кидин Н.И. Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах энергетических установок. // *ФИЗМАТЛИТ.* 2008. 176 с.
3. Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames // *Thirteenth Symposium (International) on Combustion.* 1971. P. 649–657.
4. Damköhler G. Der Einfluss der Turbulenz auf die Flammgeschwindigkeit in Gasgemischen // *Zs. Elektrochem.* 1940. V. 46. 601 p.

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Гранта Президента РФ № МК-2078.2022.1.1.*

УДК 621.9

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ЗАРОЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН НА ФОТОСФЕРНОМ УРОВНЕ СОЛНЦА

Алексеев С.В.<sup>1</sup>, Романов К.В.<sup>2</sup>, Романов Д.В.<sup>2</sup>, Романов В.А.<sup>3</sup>, Степанов Е.А.<sup>3</sup>,  
Майоров А.О.<sup>3</sup>, Лебедев А.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева,  
660049, Россия, Красноярск, ул. Ады Лебедевой, 89

<sup>3</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
410012, Россия, Саратов, ул. Астраханская, 83

В солнечных пятнах реализуется выход сильных магнитных полей из конвективной зоны в атмосферу Солнца. Визуальная регистрация расположения солнечных пятен на фотосферном уровне производится по эффекту резкого падения температуры газа в области тени пятен (~4000 К) по сравнению с температурой фотосферного газа (~6000 К). Феномен резкого понижения температуры газа в области тени детально не изучен вплоть до настоящего времени.

В настоящей работе исследуется процесс адиабатического охлаждения тонкой магнитной трубки, всплывающей из средних слоёв конвективной зоны к фотосферному уровню. Начальные значения МГД-параметров трубки определяются развитием неустойчивости Паркера в длинноволновой части спектра глобальных колебаний магнитного поля с длиной волны

порядка горизонтальных размеров стандартной активной области в солнечной атмосфере. Результаты расчётов позволяют детально проанализировать изменения МГД-параметров магнитной трубки при выходе к фотосферному уровню и получить значения физических параметров зарождающихся солнечных пятен, допускающие прямые сопоставления с данными наблюдений [2]

### Список литературы:

1. Паркер Е.М.. Космические магнитные поля, их образование и проявления : В 2-х ч. / М. : Мир, 1982. 479 с.
2. Обридо В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности / М. : Наука, 1985. 255 с.

УДК 621.785

## ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ВТСП КАТУШКАХ

Алифанов О.М., Викулов А.Г., Будник С.А., Ненарокомов А.В., Титов Д.М., Моржухина А.В.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

ВТСП-ленты 2-го поколения являются перспективными материалами для создания электротехнических устройств и, в частности, электрических вращающихся машин с рекордными мощностями удельными характеристиками для широкого применения в различных образцах техники, в то числе, на перспективных образцах летательных аппаратов [1].

Для разработки, успешного внедрения и эффективного использования ВТСП-лент и конструкций на их основе необходимо с достаточной точностью знать, в частности, их теплофизические характеристики (ТФХ) при криогенных температурах. Знание этих характеристик позволяет корректно решать задачи моделирования тепловых режимов и оптимального проектирования ВТСП-электрооборудования и электрических машин.

Обмотка катушки представляет собой многослойную конструкцию на основе тонкой ВТСП-ленты, слой которой склеены компаундом [1]. В свою очередь сама ВТСП-лента имеет сложную многослойную структуру, состав которой, в общем случае, зависит от типа, марки и производителя лены [1] (см. рис. 1). Таким образом, обмотка катушки представляет собой сложную композиционную конструкцию, которую условно можно считать композиционным материалом (КМ) со сложной структурой. ТФХ такого сложного КМ целесообразно рассматривать как некоторые эффективные ТФХ присущие материалу конкретной обмотки.

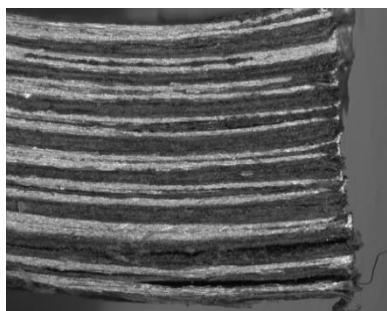


Рис.1. Сечение катушки из ВТСП-ленты (увелич. 12,5х).

Проведенные предварительные исследования показывают, что для решения задач определения эффективных ТФХ перспективных КМ может быть успешно использована комплексная экспериментально-расчетная методология идентификации процессов теплообмена на основе методов обратных задач теплообмена (ОЗТ).

Исходные данные для определения ТФХ из решения соответствующей ОЗТ формируются на основе результатов температурных измерений в образце, и включают в себя граничные условия (первого или второго рода) на охлаждаемой и обратной поверхностях образца, и зависимости температуры от времени в не-

скольких внутренних точках образца. Так для одновременного определения зависимостей от температуры коэффициента теплопроводности  $\lambda(T)$  в направлении вдоль оси образца перпендикулярной охлаждаемой поверхности и объемной теплоемкости  $C(T)$  необходимо измерить плотность отличного от нуля теплового потока хотя бы на одной границе образца и осуществить нестационарные измерения температуры не менее чем в двух внутренних точках образца [2, 3]. Для определения плотности нестационарного теплового потока  $q(\tau)$  на обратной поверхности образца устанавливается датчик теплового потока (ДТП) 5 (см. рис. 2) изготовленный из материала с известными ТФХ. На охлаждаемой и обратной поверхностях датчика установлены термодпары  $T_5$  и  $T_6$  соответственно. Плотность теплового потока на обратной поверхности определяется из решения соответствующей граничной ОЗТ по результатам температурных измерений в ДТП. На боковых поверхностях экспериментальных образцов и датчиков тепловых потоков принимаются условия, соответствующие условиям теплоизолированной стенки ( $q=0$ ).

Исследуемая в настоящей работе катушка представляет собой собранный из трех секций образец с установленными термодпарами в компаунд между секциями. Для определения  $\lambda(T)$  и  $C(T)$  были проведены два испытания – поперек и вдоль оси  $X$  перпендикулярной охлаждаемой поверхности. Схемы экспериментов представлены на рис. 2.

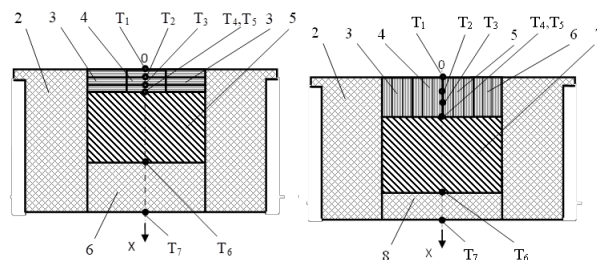


Рис. 2. Схемы криогенных испытаний с односторонним охлаждением образца.

### Список литературы:

1. Токонесущие ленты второго поколения на основе высокотемпературных сверхпроводников // Под ред. А.Мита Гояля; Пер. с англ.; Ред. Пер. А.Р. Кауль. М.: Издательство ЛКИ, 2009. 432с.
2. Алифанов О.М., Румянцев С.В. Об одном способе решения некорректно поставленных задач // ИФЖ. 1978. Т. 34. №2. С. 328 – 331.
3. Alifanov O.M., Budnik S.A., Nenarokomov A.V., Titov D.M. // Parametric identification of a mathematical model of heat transfer in carbon-carbon (C-C) materials for aeronautical application. Russian Aeronautics. 2016. V. 59. 14. pp. 548-5511.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Российской Федерацией в лице Министерства высшего образования и науки РФ соглашение № 075-15-2020-770.



УДК 532.526

## ВИХРЕВАЯ СТРУКТУРА ОБТЕКАНИЯ ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ МОДЕЛИ БПЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ И УГЛОВ ОТКЛОНЕНИЯ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ

Алпачкий Н.С., Павленко А.М., Занин Б.Ю., Мельник Е.А., Каприлевская В.С.

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

Современные БПЛА относятся к высоконаучной, высокотехнологичной области и являются одним из наиболее перспективных направлений развития авиации. Сегодня БПЛА востребованная единица техники как в военных, так и в гражданских целях. Представленное исследование направлено на изучение влияния органов управления на отрывную структуру обтекания трапецевидной модели БПЛА и является продолжением серии экспериментов направленных на изучение отрывных течений и возможностей управления обтеканием различной компоновки моделей БПЛА [1–3].

Были проведены эксперименты на дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324, которая находится в ИТПМ им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск). Эта труба имеет следующие характеристики: закрытая рабочая часть квадратного сечения  $1 \times 1$  м и длину 4 м, уровень турбулентности потока менее 0,04%. Т-324 предназначена для экспериментов при малых дозвуковых скоростях потока – примерно 70 м/с.

В трубе продувалась модель трапецевидного БПЛА спроектированная в программном комплексе SolidWorks и распечатанная на 3D принтере. Эта модель имеет следующие параметры: размах 750 мм, максимальная хорда – 500 мм, концевая – 250 мм. Угол между передними кромками –  $112,62^\circ$ .

Данные о структуре и характере течения на верхней поверхности крыла получены методом «саже-масляных» покрытий (смесь порошка двуокиси титана и керосина). С помощью этого метода были получены картины визуализаций на углах атаки  $0,5, 10, 16, 18^\circ$ .

Изучение ламинарно-турбулентного перехода проводилось методом термоанемометрии. В результате были получены профили скоростей, распределение пульсаций, спектры.

Особенностью работы является то, что модель продувалась при натуральных (полетных) числах Рейнольдса. Скорость набегающего потока составляла 15 м/с, Число Рейнольдса –  $4 \times 10^5$ , оно считалось по  $1/4$  хорде крыла.

В результате экспериментов были проведены исследования влияния органов управления с помощью саже-масляных покрытий и термоанемометрии с учетом факторов скорости набегающего потока и углов атаки.

Было проведено сопоставление данных термоанемометрии с результатами картин визуализации, полученных методом саже-масляных покрытий при разных углах отклонения органов управления (элевонов). Так же был проведен поиск возможностей управления обтекания с помощью воздействия в локальных зонах. Выступы конической формы и вдув/отсос воздуха

применялись в качестве источников возмущений. В итоге было найдено место максимальной восприимчивости течения на верхней поверхности модели. Показана возможность влияния таким методом на структуру обтекания.

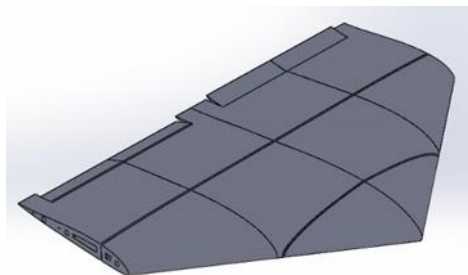


Рис. 1. 3-D Модель БПЛА

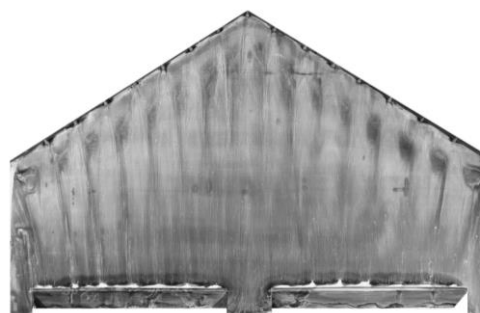


Рис. 2. Визуализация «саже-масляным» методом при угле атаки  $5^\circ$ , при отклонении элевонов вниз на  $25^\circ$ , и приклеенных конусов на передней кромке.

### Список литературы:

1. 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.
2. 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. –S.1.: 2018. –Vol. 2027 No. 1. –P. 040004(7). DOI: 10.1063/1.5065278
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 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 539.199

**ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДА ВБЛИЗИ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК****Андрющенко В.А.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Одностенные углеродные нанотрубки начинают находить широкое применение в различных устройствах и технологических процессах. К характерным примерам можно отнести элементы электроники [1], в том числе и различные химико-биологические сенсоры [2], мембраны для разделения жидкостей [3] и газов [4], а также многие другие. Однако, благодаря своим уникальным свойствам, диапазон потенциальных приложений одностенных углеродных нанотрубок является гораздо более широким.

Одной из основных проблем ограничивающих взрывной рост потенциальных приложений углеродных нанотрубок является отсутствие теоретической модели, описывающей взаимодействие нанотрубок между собой и окружающей средой. На сегодняшний день основным теоретическим методом, позволяющим исследовать данную систему из первых принципов, является метод молекулярной динамики. Данное обстоятельство породило большое количество работ по молекулярно-динамическому моделированию взаимодействия нанотрубок с жидкостью, например, [5-6]. Основными аспектами, рассматриваемыми в большинстве работ, являлись: структурирование жидкости вблизи поверхности нанотрубок и внутри них, подвижность жидкости в нанотрубках и соответствующие профили скорости, термодинамика системы [5], коэффициенты переноса, в основном, коэффициент самодиффузии и некоторые другие. Существенным аспектом, не нашедшим отражение в текущих исследованиях, является возникновение мультипольных моментов напряженности электростатического поля, обусловленных структурированием молекул полярных жидкостей, например, воды вблизи поверхности нанотрубок. Однако, очевидно, что данный фактор должен вносить существенный вклад в формирование коэффициентов переноса, а также являться определяющим для взаимодействия нанотрубок с окружающей средой и между собой.

В представляемой работе проводится молекулярно-динамическое моделирование взаимодействия одностенных углеродных нанотрубок с водой. Моделирование проводится с помощью пакета программ CHARMM [7]. Геометрия системы задаётся с помощью соответствующего веб интерфейса [8]. При изучении системы, по распределению плотности молекул воды восстанавливается распределение заряда вблизи поверхности нанотрубок. Далее у полученного электростатического поля определяются соответствующие ему моменты. В работе рассматриваются углеродные нанотрубки различной длины, диаметра, а также хиральности. Характерные примеры исследуемых нанотрубок приведены на Рис. 1. В качестве модели воды используется трехточечная модель TIP3P. Кроме того, при исследовании варьируется температура системы.

Постоянство температуры обеспечивается термостатом Нозе-Гувра, т.е. система моделируется в рамках канонического ансамбля.

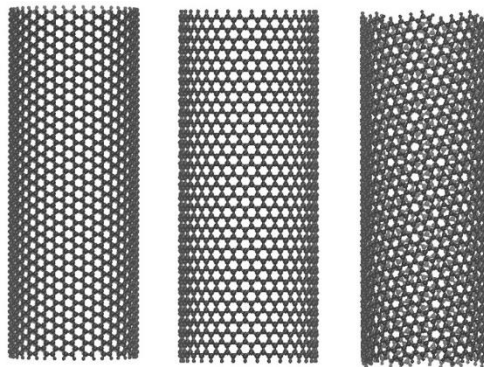


Рис. 1. Иллюстрация изучаемых нанотрубок различной хиральности. Длина и диаметр представленных нанотрубок равны 74 Å и 27 Å, соответственно.

В рамках проведённого исследования было установлено, что основными факторами, влияющими на структуру электрического поля вблизи нанотрубок является их длина и диаметр. При этом хиральность нанотрубок практически не оказывает влияние на дипольный момент исследуемой системы, однако является существенным фактором в формировании моментов электростатического поля высших порядков. Кроме того, было установлено повышение температуры не изменяет общей структуры электростатического поля, однако уменьшает значение соответствующих мультипольных моментов.

## Список литературы:

1. Zhang X. et al. Understanding the mechanical and conductive properties of carbon nanotube fibers for smart electronics // *Advanced Materials*. 2020. Т. 32. №. 5. С. 1902028.
2. Schroeder V. et al. Carbon nanotube chemical sensors // *Chemical reviews*. 2018. Т. 119. №. 1. С. 599-663.
3. Mashkoo F. et al. Carbon nanotube-based adsorbents for the removal of dyes from waters: a review // *Environmental Chemistry Letters*. 2020. Т. 18. №. 3. С. 605-629.
4. Sears K. et al. Recent developments in carbon nanotube membranes for water purification and gas separation // *Materials*. 2010. Т. 3. №. 1. С. 127-149.
5. Striolo A. et al. Water in carbon nanotubes: Adsorption isotherms and thermodynamic properties from molecular simulation // *The Journal of chemical physics*. 2005. Т. 122. №. 23. С. 234712.
6. Alexiadis A., Kassinos S. Molecular simulation of water in carbon nanotubes // *Chemical reviews*. 2008. Т. 108. №. 12. С. 5014-5034.
7. Brooks B. R. et al. CHARMM: the biomolecular simulation program // *Journal of computational chemistry*. 2009. Т. 30. №. 10. С. 1545-1614.
8. Jo S. et al. CHARMM-GUI: a web-based graphical user interface for CHARMM // *Journal of computational chemistry*. 2008. Т. 29. №. 11. С. 1859-1865.

Работа поддержана РФФ (грант № 18-19-00213).

УДК 532.5

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЛЯХ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ И ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Антонов Д.В.<sup>1</sup>, Castanet G.<sup>2</sup>, Сажин С.С.<sup>3</sup>, Стрижак П.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup> Université de Lorraine, France

<sup>3</sup> University of Brighton, United Kingdom

Процессы микро-взрывной фрагментации капель жидкостей, суспензий, растворов и эмульсий при нагревании способствуют существенному повышению эффективности технологий, в частности, в области: создания теплоносителей нового поколения из дымовых газов, паров и капель воды; огневой и термической очистки жидкостей от нерегламентированных примесей; экологичного и эффективного сжигания топлив, в том числе приготовленных из многочисленных промышленных отходов с добавлением технологических и сточных вод [1–3]. В настоящей работе приведены результаты численного моделирования теплопереноса в двухжидкостных каплях в условиях естественной и вынужденной конвекции.

Проведенные эксперименты по изучению особенностей формирования внутренних конвективных течений в испаряющихся двухжидкостных каплях перед их вскипанием и микро-взрывным измельчением при применении Micro Particle Image Velocimetry [4] показали, что возникновение таких течений приводит к изменению температурных распределений, прогнозируемых классическими моделями [5]. Кроме того, высокие градиенты скорости конвекции (рис. 1а) и температуры вблизи границы раздела вода/топливо (рис. 1б), способствующие достижению критических значений температур, соответствующих вскипанию воды и формированию пузырьков на этой границе, являются основными причинами распада двухжидкостных капель.

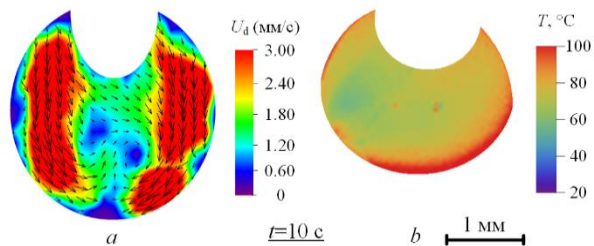


Рис. 1. Типичные поля скоростей (а) и температуры (б) двухжидкостных капель, полученные в ходе экспериментальных исследований [4].

Типичные поля скоростей и температуры двухжидкостных капель, полученные в экспериментальных исследованиях (рис. 1), иллюстрируют необходимость учета внутренних конвективных течений при моделировании. Схема для модели, позволяющей решить данную задачу, представлена на рис. 2. Система нестационарных дифференциальных уравнений включает: уравнение энергии в сферической системе координат, уравнение диффузии жидких компонентов топлива, уравнение неразрывности. В качестве граничных условий использованы: условие четвертого рода (идеальный тепловой

контакт) на границе раздела вода/топливо, условие 3-го рода (контакт с внешней средой) на границе двухжидкостная капля/газ.

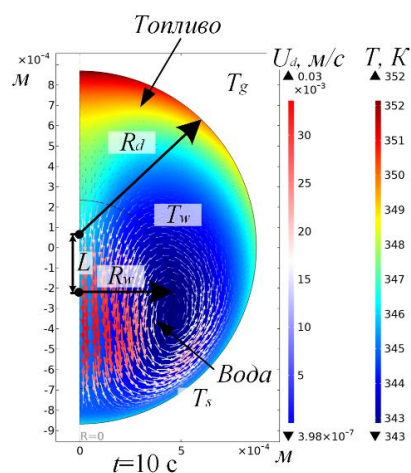


Рис. 2. Схема области решения задачи теплопереноса в двухжидкостных каплях в условиях естественной конвекции:  $R_d$  – радиус двухжидкостной капли,  $R_w$  – радиус водяного ядра,  $T_s$  – температура поверхности капли,  $T_w$  – температура на границе вода/топливо,  $T_g$  – температура газа,  $L$  – смещение водяного ядра относительно центра.

### Список литературы:

1. Watanabe H., Harada T., Matsushita Y., Aoki H., Miura T. The characteristics of puffing of the carbonated emulsified fuel // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52. P. 3676-3684.
2. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zakharevich A.V., Strizhak P.A. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects // Fuel Process. Technol. 2016. V. 148. P. 224-235.
3. Tarlet D., Mura E., Josset C., Bellettre J., Allouis C., Massoli P. Distribution of thermal energy of child-droplets issued from an optimal micro-explosion // Int. J. Heat Mass Transf. 2014. V. 77. P. 1043-1054.
4. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Misyura S.Y., Strizhak P.A. Temperature and convection velocities in two-component liquid droplet until micro-explosion // Exp. Therm. Fluid Sci. 2019. V. 109. 109862.
5. Sazhin S.S., Bar-Kohany T., Nissar Z., Antonov D., Strizhak P.A., Rybdylova O.D. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 161. 120238.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта российского научного фонда (РНФ 21-71-10008, <https://rscf.ru/project/21-71-10008/>) (Д.В. Антонов), Université de Lorraine (G. Castanet), Национального исследовательского Томского политехнического университета (П.А. Стрижак, С.С. Сажин)

УДК 537.523.5

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аньшаков А.С.<sup>1</sup>, Алиферов А.И.<sup>2</sup>, Домаров П.В.<sup>1,2</sup>, Урбах А.Э.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Основой работы является разработка и создание плоского низкотемпературного электронагревателя бытового назначения (обогрев помещений, теплиц и т.п.). Он изготовлен на основе плазменного напыления тонких электроизоляционных и электропроводящих слоев, нанесенных на теплопроводную основу-подложку (рис. 1).

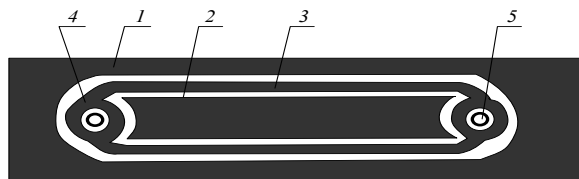


Рис. 1. Нагревательный элемент: 1 – стальная пластина; 2 – электроизоляционный слой; 3 – токопроводящая дорожка; 4 – контактные поверхности; 5 – монтажные отверстия.

Технические данные нагревательного элемента: мощность 300 Вт, напряжение питания 36 В, ток 8,5 А, габариты 900×150 мм<sup>2</sup>.

Изготовленный плазменным способом нагреватель представляет собой многослойное покрытие с токонесущим резистивным слоем определенной длины.

Для создания электроизоляционных слоев использовался порошок  $Al_2O_3$  с размером частиц 30–50 мкм, который отличается высокой жаростойкостью и большим электрическим сопротивлением. В качестве резистивного слоя применялся нихром состава Ni – 80%, Cr – 20%. Он наносился на керамический подслей толщиной 150 мкм. От толщины нихромовой пленки зависит её удельное сопротивление (рис. 2).

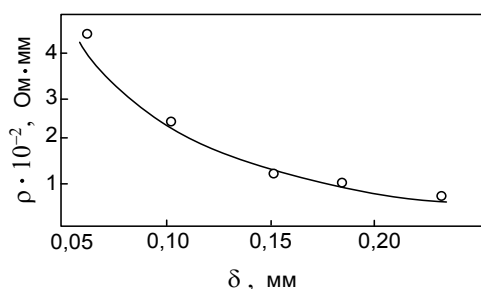


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления нихромовой пленки от её толщины.

Эксперименты по изготовлению нагревателя проводились с использованием секционированного плазмотрона ЭДП-167. Использовались рабочие газы: аргон, азот, смесь аргона с азотом. При напылении тугоплавких материалов применялась смесь с подачей 0,75–0,8 г/с азота в катодную область и 0,2–0,25 г/с аргона в область перед анодом. При этом обеспечивается максимальное напряжение дуги, высокий ресурс анода и диффузное анодное пятно для обеспечения высокой повторяемости технологии напыления.

Для получения качественных слоев нагревателя учитывались многие важные факторы: дистанция напыления, производительность порошкового дозатора, скорость перемещения столешницы, фракционный состав порошков, структура напыленных слоев и т.д.

Напыление ленточных плоских нагревателей производится на металлическом водоохлаждаемом столе, на котором крепятся закрытые масками пластины.

Толщина теплопроводящего слоя – 0,13 мм, ширина каждой из двух дорожек (см. рис. 1) – 10 мм. В местах токоподвода и на криволинейных участках резистивной дорожки толщина токопроводящего слоя на 10–20% выше, чем на прямолинейных участках. Температура пластины нагревательного элемента составляет 60–180°C с длительным ресурсом эксплуатации ( $10^4$ – $10^5$  ч и более). На основе отдельных элементов, объединяя их конструктивно в группы, можно собирать нагреватели различной мощности для обогрева жилых и производственных помещений.

Энергетические характеристики ленточного нагревателя определяются по результатам измерения тока, падения напряжения на нем и его температуры. Экспериментально показано, что вольт-амперная характеристика изготовленного нагревателя (рис. 1) возрастающая, температура его повышается с ростом силы тока (от 20 до 180°C при изменении тока через резистивные дорожки от 1,5 до 8,5 А).

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ гос. рег. 121031800229-1).

УДК 533.6.011

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТВЕРДОЙ СФЕРЫ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ****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

Движение частиц дисперсной фазы в поле силы тяжести представляет интерес при решении ряда практических задач классической гидродинамики двухфазных потоков. В частности, к ним относятся оценка экологических последствий катастрофических явлений техногенного или природного характера, моделирование процессов в тепло- и массообменных аппаратах химической технологии, вопросы образования атмосферных осадков и др. [1].

Закономерности движения частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде значительно зависят от коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_D$ , входящего в уравнение движения частицы [2]. Стандартная кривая сопротивления и подавляющее большинство эмпирических зависимостей для  $C_D$  получены без учета более сложных процессов и условий движения частицы (неизотермические условия) [3, 4].

Процесс движения частиц в ряде технических систем и технологических процессов происходит при значительной разности температур частицы и среды (например, авиационное пожаротушение, плазмохимический синтез керамических материалов и т.д.) [5, 6]. Поэтому использовать стандартную кривую сопротивления в данных условиях для расчета скорости движения частицы некорректно, поскольку при нагреве (или охлаждении) частицы происходит нагрев (или охлаждение) прилегающего к частице пограничного слоя несущей среды. Это приводит к изменению физических свойств среды (в первую очередь вязкости), входящих в число Рейнольдса и, соответственно, в коэффициент сопротивления [7].

Анализ научно-технической литературы показал, что данной тематике посвящены в большой степени расчетно-теоретические исследования [8], однако существует небольшое количество экспериментальных работ [9]. В большинстве работ для определения коэффициента сопротивления применяется стандартная кривая сопротивления, либо теоретические и эмпирические зависимости, полученные в изотермических условиях, где входящее в них число Рейнольдса рассчитывалось по характеристикам газа при «пленочной» температуре [10].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния разности температур частицы и среды на коэффициент сопротивления в процессе осаждения нагретых и охлажденных твердых сферических частиц в воздухе.

Для определения коэффициента аэродинамического сопротивления твердой сферической частицы в неизотермических условиях была разработана экспериментальная установка. Установка включает систему нагрева (или охлаждения) частиц, систему сброса частиц и систему фиксации процесса осаждения частиц. Система нагрева состоит из цилиндрического контейнера со спиралью накаливания, а система охлаждения включает в

себя специальную емкость с жидким азотом. Система сброса частиц состоит из цилиндрического контейнера, стопора и электромагнитного привода, установленных на вертикальной штанге. Система фиксации процесса осаждения частиц осуществляется времяпролетным методом с помощью лазерного комплекса, состоящего из двух лазерных лучей на начальном и конечном участках траектории движения.

В ходе экспериментов частицы нагревали до температуры ( $T_p = 373, 473$  и  $573$  К) и охлаждали до температуры ( $T_p = 82$  К) в жидком азоте. Высота сброса составляла  $x \leq 14$  м.

Представлены экспериментальные данные по коэффициенту аэродинамического сопротивления твердых сферических частиц в неизотермических условиях. Получены новые эмпирические зависимости для скорости осаждения и коэффициента аэродинамического сопротивления одиночной твердой сферической охлажденной и нагретой частицы в зависимости от разности температуры частицы и воздуха.

## Список литературы:

1. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1982. 288 с.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. М: Наука, 1987. 464 с.
3. Шрайбер А.А. Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений // Итоги науки и техники: Комплексные и специальные разделы механики. М.: ВИНТИ, 1988. С. 3–80.
4. Келбалиев Г.И. Коэффициенты сопротивления твердых частиц, капель и пузырей различной формы // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45, № 3. С. 264–283.
5. 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.
6. Гуляев И.П., Солоненко О.П. Моделирование поведения полых частиц ZrO<sub>2</sub> в плазменной струе с учетом их термического расширения // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 6. С. 789–802.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М: Высшая школа, 1967. 600 с.
8. Малай Н.В., Щукин Е.Р., Стукалов А.А., Рязанов К.С. Гравитационное движение равномерно нагретой твердой частицы в газовой среде // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49, № 1. С. 74–80.
9. Mograbi E., Ziskind G., Katoshevski D., Bar-Ziv E. Experimental study of the forces associated with mixed convection from a heated sphere at small Reynolds and Grashof numbers. Part II: Assisting and opposing flows // International journal of heat and mass transfer. 2002. V. 45, No. 12. pp. 2423–2430.
10. Матвиенко О.В., Андропова А.О. Исследование движения частицы в потоке жидкости вблизи подвижной стенке // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2015. № 36. С. 85–92.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0036.*

УДК 532.543

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОСАЖДЕНИЯ И 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

Движение кластера частиц дисперсной фазы в поле силы тяжести представляет значительный интерес при решении ряда практических задач, связанных с двухфазными течениями. В частности, к ним относятся моделирование процесса авиационного пожаротушения [1], прогнозирование распространения выбросов токсичных веществ промышленных предприятий при чрезвычайных ситуациях [2], оценка экологических последствий при аварийном сбросе компонентов авиационного керосина и жидкого ракетного топлива [3–5] и др.

Закономерности гравитационного осаждения кластера капель зависят от большого количества параметров, таких как количество и начальная объемная концентрация капель в кластере, процессы взаимодействия частиц между собой и с дисперсионной средой. Процесс осаждения кластера капель в ряде прикладных задач для теплотехнических систем и технологических процессов происходит в высокотемпературной среде и при взаимодействии с очагом горения [6, 7]. В данных случаях на динамику осаждения также оказывает значительное влияние процесс испарения капель, для которого важную роль играет температура окружающей среды и интенсивность теплового потока.

Представленные закономерности являются фундаментальной основой для разработки и модификации математической модели эволюции жидко-капельного аэрозольного облака, образующегося при разрушении большого массива жидкости в процессе гравитационного осаждения в высокотемпературной газовой среде.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния скорости и температуры внешнего воздушного потока, а также начальной объемной концентрации капель в кластере на динамику его осаждения и испарения.

Для исследования динамики осаждения и испарения монодисперсного кластера капель была разработана экспериментальная установка. Установка включает систему подачи жидкости, систему подачи обдувающего теплового потока и систему визуализации процесса. Система подачи жидкости состоит из полости цилиндрической емкости с равномерно расположенными капиллярами на ее торцевой поверхности. Внутренняя полость емкости соединена с воздушным микрокомпрессором через электропневмоклапан, управляемый низкочастотным генератором напряжения. Обдувающий тепловой поток создавался с помощью тепловентилятора. Визуализацию процесса гравитационного осаждения кластера капель осуществляли с помощью двух скоростных цифровых видеокамер.

В ходе экспериментов емкость заполняли дистиллированной водой. После включали тепловентилятор. Для определения скорости обдувающего потока использовали анемометр, а для определения температуры газового потока использовали термопары. После включали видеокамеры и воздушный микрокомпрессор. Подавая импульсы напряжения от генератора на электропневмоклапан, создавались возмущения, которые приводили к одновременному отрыву капель от срезов капилляров и последующему образованию монодисперсного кластера равномерно расположенных в пространстве капель. За счет многократного создания импульсов давления внутри цилиндрической емкости, получали с заданной частотой идентичные монодисперсные кластеры капель.

Представлены экспериментальные данные по влиянию скорости и температуры внешнего воздушного потока, а также начальной объемной концентрации капель в монодисперсном кластере на закономерности его осаждения и испарения в поле силы тяжести.

### Список литературы:

1. Кудров М.А. Динамика объема жидкости в газовом потоке с учетом деформации, дробления и срыва капель // Научный вестник МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. 2010. № 151. С. 163–168.
2. Гляшева Р.Р., Солодовников А.В. Методы прогнозирования аварийных ситуаций с образованием облаков топливовоздушных смесей на предприятиях нефтепереработки // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2006. № 1. С. 1–7.
3. 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.
4. Maslov E., Badmaev A., Zharova I. Dynamics and Heat and Mass Transfer of Liquid-Droplet Cloud in the Emergency Discharge of Aviation Fuel into the Atmosphere / MATEC Web of Conferences. 2017. V. 110, No. 19. Paper 01007.
5. 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.
6. 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.
7. Гуляев И.П., Солоненко О.П. Моделирование поведения пыльных частиц  $ZrO_2$  в плазменной струе с учетом их термического расширения // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 6. С. 789–802.

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 22-19-00307.*

УДК 536.46

## ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

Архипов В.А.<sup>1</sup>, Волков С.А.<sup>1</sup>, Золоторёв Н.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

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

В процессе работы твердотопливного ракетного двигателя при выбранных его геометрических характеристиках и заданных характеристиках топлива возможно возникновение и развитие высокочастотных колебаний давления с расходящейся амплитудой и частотой (300–500) Гц, обусловленных близкими значениями собственных частот камеры сгорания и процесса горения. Высокочастотная неустойчивость камеры сгорания способствует возникновению и развитию вибрационного или резонансного горения, приводящего к неконтролируемому росту давления и, в конечном счете, к взрыву камеры сгорания [1]. Несмотря на современные способы и возможности вычислительных машин, математическое моделирование процессов высокочастотной неустойчивости не обходится без экспериментальных данных. В связи с этим возникает необходимость проведения экспериментальных исследований с определением характеристик акустической проводимости топлива на указанных частотах и последующей оценкой работоспособности конструкции камеры сгорания.

Основным источником усиления акустических колебаний является поверхность горения твердого топлива (ТТ). Процесс усиления малых возмущений параметров газовой фазы, которые всегда присутствуют в виде турбулентных шумов, связан с откликом поверхности горения в виде дополнительной порции продуктов сгорания и энергии. При определенном соотношении частоты возмущений и частоты, соответствующей времени релаксации волны горения, первоначальное малое возмущение давления усиливается, что приводит к возникновению режима вибрационного горения.

В настоящее время интерес к исследованиям высокочастотной неустойчивости значительно возрос [2, 3], что связано с разработкой перспективных составов ТТ, содержащих новые компоненты (активные горюче-связующие, нанопорошки металлов, катализаторы горения и т.д.). Скорость горения таких составов существенно выше, чем у известных составов ТТ. При этом становится реальной возможность возникновения неустойчивых режимов горения.

Для наблюдения за характером возникновения акустической волны горения используются камеры сгорания, специально приспособленные для изучения вибрационного горения. Современные методы и системы регистрации акустических колебаний позволяют получить качественные результаты экспериментальных исследований. Для экспериментального исследования акустической проводимости твердого топлива используется Т-камера, названная из-за конфигурации в виде буквы Т. Представляет собой цилиндрический резонатор на торцах которого расположены

образцы твердого топлива. Т-камера оснащена баллоном ресивером для сброса продуктов сгорания, системой зажигания образцов и датчиками регистрации сигнала. Давление в камере сгорания и ресивере накачивалось с помощью компрессора. Для отработки методики в качестве образцов ТТ был выбран баллитит марки РНДСИ-5К с известными характеристиками. На образце диаметром 40 мм и высотой  $2 \div 3,5$  мм с помощью токарного станка были изготовлены канавки имеющие форму концентрических окружностей. Увеличение поверхности горения необходимо для генерации акустических колебаний.

На рисунке приведена осциллограмма генерации акустических колебаний при горении ТТ.

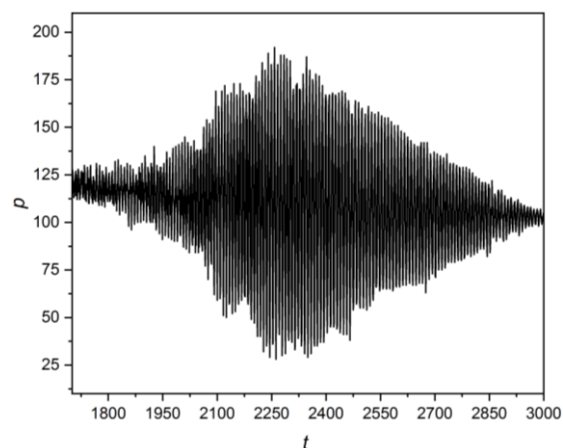


Рис. 1. Осциллограмма процесса горения ТТ.

По результатам отработки методики исследования акустической проводимости получены зависимости частоты акустических колебаний от длины резонатора. При длине резонатора 625 мм генерация акустических колебаний составляет около 750 Гц, при длине 785 мм около 575 Гц, а при длине 1045 мм частота колебаний составляла 318 Гц.

### Список литературы:

1. Horton M.D. Use of the one-dimensional T-burner to study oscillatory combustion // AIAA J. 1964. Vol. 2. No. 6 P. 1112-1118.
2. Su W., Wang N., Li J., Zhao Y., Yan M. Improved method of measuring pressure coupled response for composite solid propellants // J. Sound Vib. 2013. Vol. 333. No 8. P. 2226-2240.
3. Куроедов А.А., Борисов Д.М., Семенов П.А. Определение акустической проводимости зоны горения безметалльных и металлизированных энергетических конденсированных систем // Труды МАИ. 2018. № 98. С. 4.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0036.

## НЕЛИНЕЙНОЕ ЭВОЛЮЦИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ДВУХСЛОЙНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В НАКЛОННОМ КАНАЛЕ

Архипов Д.Г., Хабахпашев Г.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
e-mail: arkhypovdm@yandex.ru

Теоретические исследования устойчивости двухжидкостных течений в 1960-х годах привели к открытию, так называемой, поверхностной моды возмущений, неустойчивой при сколь угодно малых скоростях течения вследствие резкого различия вязкостей жидкостей на границе раздела. Подробное изучение свойств данной моды в численных работах Yiantsios и Higgins [1] выявило стабилизирующий эффект стратификации плотности так, что для традиционных двухслойных систем поверхностная мода оказывается не самой опасной. В работе [2] были рассмотрены системы с незначительным различием плотностей, где стабилизирующий эффект относительно слаб. Обнаружено, что с увеличением глубин жидкостей, когда вязкие эффекты также становятся слабыми, неустойчивость не ослабляется, а лишь усиливается и поверхностная мода асимптотически стремится к неустойчивости типа критического слоя в идеальной жидкости. Таким образом задача устойчивости оказывается связана с классической проблемой взаимодействия внутренних гравитационных волн со сдвиговыми течениями.

Гидродинамическая система уравнений двухслойной жидкости допускает преобразование Сквайра так, что результаты, полученные в плоском случае, справедливы также и для малых трехмерных возмущений. При ее решении определяются профили вертикальной и горизонтальной скорости жидкости, как в отсутствии, так и при наличии в нем критического слоя, а также дисперсионные характеристики волн. В предположении слабой диссипации профили вертикальной скорости находятся аналитически. Для случая вязких жидкостей в каждом из слоев численно решены уравнения Орра–Зоммерфельда с последующей сшивкой решений на границе раздела.

На основе найденных профилей выведено нелинейное эволюционное интегро-дифференциальное уравнение для плоских умеренно-длинных возмущений границы раздела жидкостей. Коэффициенты уравнения представлены интегралами по толщинам слоев от функций, зависящих от профилей стационарного потока и возмущения. Один из интегралов в этом уравнении соответствует диссипации в нестационарных пограничных слоях, а другой – перекачке энергии из потока в волну.

Для случая небольших потоков справедливо предположение линейности профилей нормальных скоростей по нормальной координате, что позволяет аналитически рассчитать коэффициенты эволюционного уравнения. Аналогично тому, как это было сделано в [3], в данной работе такое уравнение удалось обобщить на квазидвумерный случай, когда градиенты по трансверсальной координате малы. Уравнение позволяет единым образом рассчитывать эволюцию нелинейной волны и отходящих от нее возмущений малой амплитуды и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + (1 + S_f) \rho_{0i} \cdot \nabla \frac{\partial \eta}{\partial t} - c_0^2 \nabla^2 \eta + S_f (\rho_{0i} \cdot \nabla)^2 \eta - \\ & - C_d \frac{\partial^2}{\partial t^2} \nabla^2 \eta - C_{Nxx} \frac{\partial^2 \eta^2}{\partial x^2} - C_{Nxy} \frac{\partial^2 \eta^2}{\partial x \partial y} - C_{Nyy} \frac{\partial^2 \eta^2}{\partial y^2} + \\ & + \int_0^t \left( C_{Bxx} \frac{\partial^2 \eta^2}{\partial x^2} + C_{Bxy} \frac{\partial^2 \eta^2}{\partial x \partial y} + C_{Byy} \frac{\partial^2 \eta^2}{\partial y^2} \right) \frac{dt'}{\sqrt{t-t'}} = 0 \end{aligned}$$

Здесь  $\eta$  — возмущение границы раздела жидкостей,  $t$  — время,  $x$  и  $y$  — продольная и трансверсальная координаты в плоскости невозмущенной границы раздела,  $S_f$  — коэффициент характеризующий влияние течения на распространение линейных волн, а коэффициенты  $C_d$ ,  $C_{Nij}$  и  $C_{Bij}$  связаны с воздействием дисперсионных, нелинейных и диссипативных эффектов, соответственно.

Выяснена возможность обобщения полученного уравнения на случай достаточно больших (в том числе закритических) скоростей потока. С ростом скорости стационарного течения профили возмущений скоростей по вертикальной координате становятся существенно нелинейными, но все еще слабо зависят от волнового вектора. Эта особенность позволяет использовать данные линейного анализа (фазовую скорость длинных волн, профили вертикальной скорости и инкременты роста) при построении слабонелинейного уравнения. Возникновение критического слоя характеризуется появлением положительной мнимой добавки к фазовой скорости длинных волн слабо зависящей от их длины. Это позволяет упростить учет эффекта перекачки энергии из потока в волну. В результате возникает дополнительное интегральное слагаемое в эволюционном уравнении.

Численно проанализировано влияние вязкости на начальные возмущения солитонного типа, а также на более короткие и длинные волны. При рассмотрении пространственных волн выяснено, что изначально симметричное куполоподобное возмущение под действием потока преобразуется в подковообразную волну, двигающуюся в спутном со стационарным течением направлении.

### Список литературы:

1. Yiantsios S.G., Higgins B.G. Linear stability of plane Poiseuille flow of two superposed fluids // Phys. Fluids. 1988. V. 31, No. 11. P. 3225–3238.
2. Arkhipov D.G., Kachulin D.I., Khabakhpashev G.A. Instability of waves on an interface of two-layer Poiseuille flow // Proc. 10th Int. Conf. Appl. and Theor. Mech. Salerno. 2014. P. 63–68.
3. Архипов Д.Г., Хабахпашев Г.А. Эволюция длинных волн на границе раздела расслоенного течения вязких жидкостей в канале // Прикл. механ. и техн. физ. 2007. Т. 48, №4. С. 49–62.

*Исследования выполнены в рамках гос. задания ИТ СО РАН (№ 121031100246-5).*



УДК 536.24

## ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА РЁБЕР РАДИАТОРА НА ЕСТЕСТВЕННУЮ КОНВЕКЦИЮ ЖИДКОСТИ ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ В ПОЛОСТИ С ТЕПЛОУДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Астанина М.С., Шеремет М.А.

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

Современные темпы развития теплоэнергетики и промышленного сектора в целом требуют хорошей теоретической проработки технологических процессов. К таким процессам относится проектирование тепловых систем с разработкой наиболее эффективных способов теплоотвода. Пассивные системы охлаждения, работающие за счёт естественной конвекции, являются наиболее доступными для реализации, а методы математического моделирования открывают широкий спектр инструментов для изучения таких систем. К настоящему времени исследования проведены для замкнутых областей различных конфигураций с учётом разнообразных типов нагрева и охлаждения [1–3].

Для интенсификации теплоотвода используют несколько способов: введение рабочих сред с эффективными теплофизическими характеристиками (например, добавление наночастиц высокотеплопроводного материала в традиционный теплоноситель) или включение в систему дополнительных элементов (например, пористые вставки, твёрдые блоки или радиаторы). Варьирование теплофизических и геометрических свойств этих объектов позволяет регулировать теплоотвод.

В настоящем исследовании проводится численное моделирование естественно-конвективного теплопереноса в замкнутой двумерной области при наличии медной подложки с рёбрами и теплоуделяющим элементом на нижней стенке (рисунок 1). Рассматриваются два варианта рёбер – твёрдые и пористые. В качестве материала пористых рёбер используется алюминиевая пена. Материал пористых ребер считается средой изотропной, проницаемой для жидкости. Внешние границы подложки теплоизолированы, в то время как границы полости имеют постоянную температуру  $T_c$ . В качестве рабочей среды используется теплопроводная ньютоновская жидкость с зависимой от температуры вязкостью по экспоненциальному закону [4].

Поставленная задача с соответствующими начальными и граничными условиями была разрешена с помощью метода конечных разностей на равномерной вычислительной сетке. Математическая модель строилась на основе уравнений Навье-Стокса с последующим введением безразмерных переменных «функция тока – завихрённость – температура» с целью исключения поля давления из решения [4, 5]. Численные эксперименты были проведены с использованием собственного программного кода на языке программирования C++ с предварительной процедурой верификации и проверки сеточной сходимости.

Исследования были проведены в большом диапазоне изменения безразмерных определяющих чисел

Рэля и Дарси, а также безразмерных геометрических характеристик подложки и рёбер.

В качестве результата были получены двумерные распределения изотерм и изолиний функции тока внутри области, а также распределения интегральных характеристик теплообмена (число Нуссельта, средняя температура в полости и источнике).

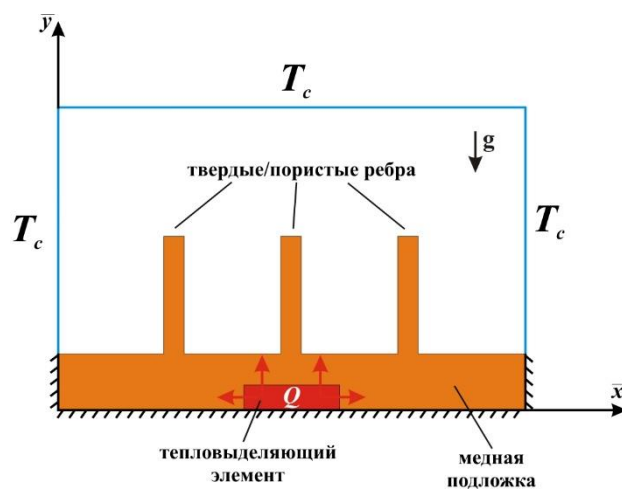


Рис. 1. Физическая модель задачи.

Особое внимание при анализе результатов было уделено оценке эффективности теплоотвода при использовании различных типов рёбер: твёрдые и пористые.

### Список литературы:

1. Cao Y., Farouk N., Ayed H., Aly A. A., Jarad F., Dahari M., Wae-hatee M., Saleh B. Heat transfer improvement between a pair of heater and cooler inside an energy storage by using nano-encapsulated phase change material/water: A numerical modeling// Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 30. 101770.
2. Zhang Y., Liu X. Application of Field Synergy Principle for Fin Reshaping of a Natural Convection Radiator// Procedia Engineering. 2015. Vol. 121. P. 1726–1733.
3. Das D., Lukose L., Basak T. Role of multiple discrete heaters to minimize entropy generation during natural convection in fluid filled square and triangular enclosures// International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 127. P. 1290–1312.
4. Astanina M.S., Sheremet M.A., Mahabaleshwar U.S., Singh J. Effect of Porous Medium and Copper Heat Sink on Cooling of Heat-Generating Element// Energies. 2020. Vol. 13. №10. 2538.
5. Bondareva N.S., Buonomo B., Manca O., Sheremet M.A. Heat transfer performance of the finned nano-enhanced phase change material system under the inclination influence. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, Vol. 135, P. 1063–1072.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

УДК 532.54

## УТИЛИЗАЦИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПЛАСТАХ. НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Афанасьев А.А.

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова,  
119192, Россия, Москва, Мичуринский пр., 1

Исследование многофазных течений, сопровождающих утилизацию (т.е. захоронение) сверхкритического углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) в водонасыщенных и нефтяных пластах представляет актуальную задачу. Углекислый газ – парниковый газ, выбросы которого в атмосферу приводят к глобальному потеплению. Снижение антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  за счет закачки и долгосрочного хранения газа в проницаемых недрах Земли является важнейшим средством решения климатических проблем. В нашей стране быстро возрастающий интерес к декарбонизации также связан с планирующимся введением трансграничного углеродного регулирования и созданием рынка квот на выбросы парниковых газов. Предполагается, что поставки потребителям ископаемого топлива, сжигание которого приводит к загрязнению окружающей среды, будут облагаться дополнительным “углеродным” налогом. В этой связи захоронение продуктов сжигания топлива, в частности  $\text{CO}_2$ , является средством для снижения воздействия отмеченного налогообложения на традиционные энергоресурсы.

Скрининг недр с целью определения геологических объектов, т.е. конкретных пластов, в которых можно безопасно хранить большие объемы парниковых газов, требует повсеместного применения численного моделирования многофазной многокомпонентной фильтрации в широком диапазоне давлений и температур, содержащем критические термодинамические параметры жидкостей и газов. Только с помощью гидродинамического моделирования можно определить такие важные показатели геологических объектов как емкость (объем газа, который можно захоронить), приемистость (максимальный темп нагнетания газа в пласт) и безопасность захоронения (отсутствие сценариев, при которых газ может вернуться в атмосферу). Оценка данных показателей осложняется околокритическим состоянием  $\text{CO}_2$ , растворением газа в пластовой воде и нефти, фазовыми превращениями между жидким и газообразным  $\text{CO}_2$ , примесями других газов (например, азота) и другими эффектами.

В докладе будет дан обзор моделей, учитывающих отмеченные эффекты, и представлены результаты приложения этих моделей в исследованиях утилизации  $\text{CO}_2$  в водонасыщенных пластах [1–3].

Во-первых, будут представлены результаты исследования нелинейных волн – фронтов вытеснения, температурных разрывов и волн Римана – распространяющихся от нагнетательной скважины в пласт на начальных этапах закачки газа. На фазовой плоскости ограничены области качественно различных решений, взаимное расположение которых определяется околокритическим термодинамическим состоянием  $\text{CO}_2$ .

Показано, что в существующих проектах утилизации закачка газа приводит к распространению различных пакетов волн [2].

Во-вторых, будут представлены результаты моделирования утечки  $\text{CO}_2$  к поверхности Земли. В таких случаях, при снижении давления образуются две фазы жидкого и газообразного  $\text{CO}_2$  и происходит интенсивное испарение сжиженного газа, приводящее к снижению температуры [1].

В-третьих, будут представлены результаты исследования, позволившего определить безразмерный критерий подобия, характеризующий максимальное расстояние, на которое газ распространится в наклонном к горизонту пласте. Критерий получен из системы законов сохранения, описывающих несмешивающуюся фильтрацию воды и газа, и подтвержден в рамках обширного параметрического исследования нагнетания  $\text{CO}_2$  в различные пласты.

В-четвертых, исследована перспективность закачки  $\text{CO}_2$  в подземные хранилища природного газа (ПХГ) с целью замещения буферного газа сверхкритическим  $\text{CO}_2$  и захоронения  $\text{CO}_2$ . Выполнено трехмерное моделирование в рамках расчета фильтрации смеси  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4$ . Предложена стратегия эксплуатации ПХГ с двумя группами скважин, одна из которых используется для закачки и отбора природного газа ( $\text{CH}_4$ ), а вторая – для захоронения  $\text{CO}_2$  на периферии ПХГ. Показано, что за счет циклического изменения направления фильтрации газов, вызванного закачкой и отбором  $\text{CH}_4$  из ПХГ, более половины утилизированного  $\text{CO}_2$  можно растворить в пластовой воде. При этом объем растворенного  $\text{CO}_2$  в несколько раз больше рабочего (активного) объема ПХГ. Таким образом, предложенная стратегия закачки газов позволяет эффективно захоронить  $\text{CO}_2$  в ПХГ. Показано, что тем не менее закачка  $\text{CO}_2$  также сопровождается и негативными последствиями, связанными с перемешиванием газов в пласте [3].

### Список литературы:

1. Afanasyev A.A. Multiphase compositional modelling of  $\text{CO}_2$  injection under subcritical conditions: The impact of dissolution and phase transitions between liquid and gaseous  $\text{CO}_2$  on reservoir temperature // *Int. J. Greenhouse Gas Control* 2013. V. 19. P. 731-742.
2. Afanasyev A.A. On the Riemann problem for supercritical  $\text{CO}_2$  injection into an aquifer // *Int. J. Greenhouse Gas Contr.* 2015. V. 42. P. 629-643
3. Afanasyev A., Vedeneva E. Compositional modeling of multicomponent gas injection into saline aquifers with the MUFITS simulator // *2021 J. Nat. Gas Sci. Eng.* V. 94. 103988.
4. *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 19-71-10051).*

УДК 621.165:621.69

## РАЗРАБОТКА ЭЖЕКТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ ПОДОГРЕВА СЕТЕВОЙ ВОДЫ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Балакин Д.Ю., Аронсон К.Э., Демидов А.Л.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

Эффективность работы паротурбинной установки (ПТУ) в значительной степени определяется низкопотенциальной частью турбины, в частности количеством присасываемого воздуха и работой схемы его удаления.

Вакуумная система теплофикационных турбин кроме конденсатора включает в себя подогреватели сетевой воды (ПСГ). В определённых режимах работы ПСГ могут являться источниками присоса воздуха в вакуумную систему. Это приводит к снижению вакуума в конденсаторе, в результате чего снижается и КПД турбоустановки.

Одним из путей снижения влияния таких присосов воздуха на эффективность работы ПТУ является разделение схем отсоса воздуха из конденсатора и ПСГ. Традиционно в схемах теплофикационных турбин для этой цели использовался основной эжектор турбины; специальные эжекторы не разрабатывались. Однако в случае, когда присосы воздуха значительно превышают нормативные значения, вопрос о применении специального эжектора ПСГ становится особенно актуальным.

Такой эжектор для отсоса неконденсирующихся газов из ПСГ разработан авторами и установлен на Стерлитамакской ТЭЦ. Эжектор (см. рис. 1) выполнен двухступенчатым с выносным предохладителем; охладители ступеней также вынесены в отдельные корпуса. Применение предохладителя позволяет уменьшить давление всасывания и снизить поступление пара с паровоздушной смесью в первую ступень эжектора.



Рис.1. Эжектор ПСГ

Также в эжекторе реализован ряд технических решений, направленных на повышение его эффективности и надежности. В частности, эжектор оснащен уз-

лом, позволяющим изменить осевое расстояние эжектора для его точной настройки. Диффузор первой ступени эжектора, как и сопла всех ступеней, выполнен из коррозионностойкой нержавеющей стали для повышения долговечности этих элементов. Для охладителей эжектора использованы трубки из нержавеющей стали, а для компенсации снижения теплопроводности трубки выполнены профилированными [1].

Эжектор включен по охлаждающей воде в линию основного конденсата после основных эжекторов. Дренаж греющего пара из эжектора удаляется в конденсаторосборник ПСГ.

Испытания модернизированной схемы отсоса воздуха из ПСГ проводилось в зимний период во время работы турбины с номинальной электрической нагрузкой. По результатам испытаний после перевода отсоса воздуха из ПСГ на эжектор ПСГ уменьшилось количество присосов воздуха в конденсатор с  $G_a=42$  кг/ч до  $G_a=32$  кг/ч и снизилось давление пара в конденсаторе на 0,12 кПа. Такое «углубление» вакуума эквивалентно увеличению мощности турбины на 88 кВт.

Также необходимо отметить, что при переводе отсоса воздуха из ПСГ на эжектор ПСГ снизилось значение недогрева сетевой воды на выходе из ПСГ до значения 0,4°C. Оценка изменения мощности турбины от данного эффекта по величине удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении составила 150 кВт.

Кроме этого, было обнаружено, что при небольших количествах отсасываемого воздуха эжектор ПСГ возможно использовать в одноступенчатом исполнении, значительно снижая таким образом расход пара на собственные нужды ПТУ. Это возможно по причине того, что сжатие ПВС, удаляемой из ПСГ, до барометрического давления реализуется на второй ступени эжектора. Иными словами, в режимах с низкими присосами воздуха в вакуумную систему первая ступень эжектора практически не функционирует.

Результаты испытаний модернизированной схемы удаления неконденсирующихся газов из ПСГ и разработанного эжектора показали, что использованные технические решения рациональны и приводят к повышению эффективности работы ПТУ.

### Список литературы:

1. Повышение эффективности и надежности теплообменных аппаратов паротурбинных установок: 4-е изд., перераб. и доп. /Под общ. ред. докт. техн. наук Ю.М. Бродова. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. 570 с.

УДК 536.2:621.365

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМАХ НАГРЕВА С РЕЗИСТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Балобанов Н.А.

Удмуртский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук  
426067 г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34

Проблемам, связанным с теплопереносом в системах электро-, тепло-, и горячего водоснабжения на основе солнечных панелей, солнечных коллекторов, ветрогенераторов, тепловых насосов, систем теплого пола и других системах обогрева уделяется большое внимание [1]. В частности, при сооружении промышленных и жилых зданий широко применяются напольные системы отопления. Традиционно источником тепла в напольных системах отопления являются трубки, по которым течет горячий теплоноситель или электрический кабель или пленка, выделяющие тепло при протекании тока [2]. Так, в работе [3] рассмотрен электрический теплый пол «греющий кабель». Приведены результаты экспериментального определения его тепловых характеристик и энергопотребления. Предложена математическая модель и программное обеспечение для расчетов теплых полов типа "греющий кабель". Целью настоящей работы является разработка математической модели процесса теплообмена в системе нагрева с резистивными элементами и проведение численного моделирования, позволяющее проводить оценку теплового состояния системы на временных интервалах. Основываясь на работах [4, 5] разработана математическая модель теплообмена в двухмерной нестационарной постановке. Для определения величины мощности теплового источника в правой части уравнения энергии, использовались соотношения, приведенные в [6]. Уравнение двумерной нестационарной теплопроводности решается методом конечных разностей, записанных по явной разностной схеме. При решении двухмерной задачи нестационарной теплопроводности использовался метод расщепления по направлениям. В качестве граничных условий принимались граничные условия третьего рода. Поля температур для двух и шести нагревательных элементов, расположенных последовательно приведены на рис. 1 и на рис. 2. Для проведения расчетов приняты следующие исходные данные: геометрические размеры нагревательной системы, м:  $L = 0.3$ ,  $H = 0.4$ , резистивный элемент имеет размеры:  $l = 25 \cdot 10^{-5}$ ,  $h = 2 \cdot 10^{-3}$ .

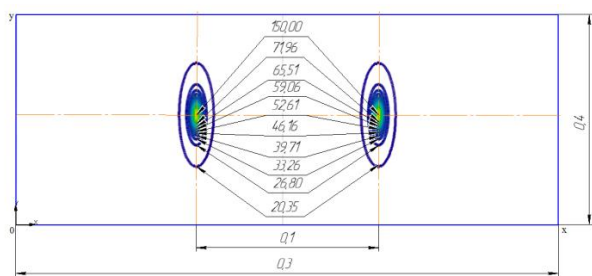


Рис. 1. Поле температур с двумя нагревательными элементами.

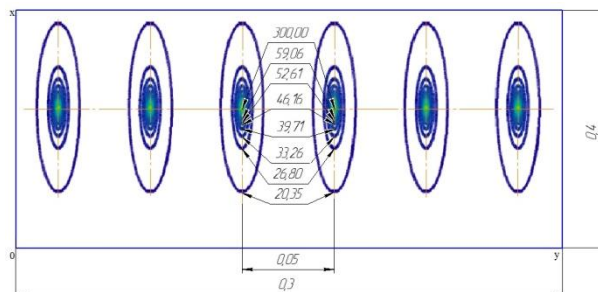


Рис. 2. Поле температур с шестью нагревательными элементами.

В качестве наполнителя в устройстве используется легкий бетон [7]. Температура окружающей среды и начальная температура наполнителя  $20^{\circ}\text{C}$ . Величина коэффициента теплоотдачи  $\alpha = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ . Время расчета 10 с. Температура источников постоянна и равна для системы двух элементов  $150^{\circ}\text{C}$ , а для системы из шести элементов  $300^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, представленная в работе математическая модель и ее численная реализация, позволяет проводить параметрических исследований теплообмена в двухмерной нестационарной постановке в системе нагрева с резистивными элементами, в частности, давать оценку интенсивности распределения температуры по времени процесса в зависимости от мощности теплового источника, теплофизических свойств наполнителя, геометрии и количества нагревательных элементов.

### Список литературы:

1. Низовцев М.И. Возобновляемая энергетика. Современное состояние и перспективы. // Сборник докладов III Всероссийской научной школы с международным участием «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий». Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН 21–23 марта 2017 г. Новосибирск, 2017. С. 187- 198.
2. Низовцев М.И., Сахаров И.А. Расчет взаимного влияния тепловых и конструктивных параметров водяного теплого пола // Ползуновский вестник. 2013. №4-3. С. 33-37.
3. Низовцев М.И., Бородулин В.Ю., Летушко В.Н. Определение тепловых характеристик и энергопотребления электрического теплого поля "греющий кабель" // Ползуновский вестник, 2015. №4-1. С. 39-46.
4. Липанов А.М., Макаров С.С. Численное решение задачи нестационарного теплообмена при охлаждении высокотемпературного металлического тела прямоугольной формы // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2012. № 2 (54). С. 35-38.
5. Липанов А.М., Макаров С.С. Численное решение задачи охлаждения сопряженных прямоугольных высокотемпературных металлических тел // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2012. № 3 (55). С. 37-43.
6. Заяц А.Е. Электрические элементные нагреватели. /Под ред. Е.М. Заяца. Минск: БГАТУ, 2011. 180 с.
7. А.У. Франчук Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: НИИ строительной физики, 1969. 142 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-00481 а.

УДК 621.039.5

## ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ТИПА ВВЭР-1200 ДЛЯ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Баранова Т.А., Жукова Ю.В., Кухарчук И.Г., Чорный А.Д.

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
220072, Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 15

Одним из критериев эффективной работы энергетических установок является приоритет высокого уровня их безопасности. Известно, что зачастую снижение надежности и безопасности ядерных энергетических установок (ЯЭУ) обусловлено недооценкой важности теплофизических проблем, возникающих при эксплуатации ЯЭУ. Решение теплофизических задач рассматриваются во взаимосвязи гидродинамических и тепломассообменных процессов, обычно существенно зависящих от характера течения и распределения скорости, давления, температуры в отдельных элементах реакторной установки (РУ) [1].

В современных подходах анализа эксплуатации, аварийных режимов работы, оценки безопасности, теплотехнической надежности ЯЭУ [2] отчетливо проявляется тенденция, заключающаяся в переходе от расчетов средних значений расхода, температуры и давления к локальным. Такой подход важен для наиболее теплонапряженных узлов активной зоны РУ, парогенераторов и теплообменников. В этом случае необходимо знать не только средние значения скоростей, но и их детальное распределение по сечению каналов, распределение температур по поверхности, а также учесть возможные отклонения действительных значений исследуемых характеристик от расчетных. В настоящей работе представлены результаты исследования средствами CFD-моделирования теплогидравлических процессов в элементах оборудования РУ типа ВВЭР-1200 для стационарных режимов эксплуатации ЯЭУ.

Для теплогидравлического анализа разработана трехмерная САД-модель РУ типа ВВЭР-1200, включающая корпус, опускной канал, внутрикорпусную шахту, опорные стаканы, выгородки, активную зону и блок защитных труб. Физико-математическая модель для неизотермических потоков теплоносителя включала уравнения Рейнольдса, замкнутые с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Менгера. Перенос тепла теплоносителем моделировался с помощью уравнения энергии, сформулированного в терминах энтальпии. Тепловое взаимодействие между стенками и теплоносителем определялось сопряженной постановкой задачи. Теплофизические свойства теплоносителя (плотность, вязкость, коэффициент теплопроводности) и материалов стенок задавались в виде кусочно-линейных функций, зависящих от температуры и давления, и согласно справочной литературе. Согласно эксплуатационным данным на входе в РУ задавался массовый расход теплоносителя 4474 кг/с, давление 16,54688 МПа и температура 298,2°C для каждой петли. На выходных патрубках задавались мягкие граничные условия – равенство нулю градиен-

тов всех рассчитываемых величин. Для всех тепловыделяющих сборок задавалась величина теплового потока равного 9,861 МВт/м<sup>2</sup>. Внешние стенки РУ теплоизолированы. Моделирование реализовано с помощью ПО Ansys Fluent 2020 R1.

Сравнение результатов расчета с данными для стационарного режима эксплуатации ВВЭР-1200 (Таблица 1) показало, что расчетный перепад давления между входным и выходным патрубками составил 409,88 кПа, тогда как согласно эксплуатационным данным – 435,88 кПа, т. е. отклонение расчетных данных от эксплуатационных не превышает 6,3%. Полученное значение температуры 328,07°C теплоносителя в выходных патрубках РУ находится в диапазоне между эксплуатационными значениями на выходе из активной зоны 328,8°C и под крышкой реактора 328,12°C.

Полученные результаты необходимы для анализа аварийных сценариев функционирования РУ, например, связанных с подачей холодного теплоносителя в первом контуре, прогнозирования усталостных термонапряжений и разрушения поверхностей и т.д.

Таблица 1. Сравнение эксплуатационных и расчетных характеристик ВВЭР-1200 (В-491).

Наименование характеристики	Техническая [2]	Эксплуатационные данные	Моделирование
Тепловая мощность, МВт	3200	3201,9	3201,9
Количество ТВС в активной зоне, шт	163	163	163
Температура на входе в активную зону, °C	298,2	299,455	298,2 (на входе в реактор)
Температура на выходе из активной зоны, °C	328,6	328,8	328,07 (на выходе из реактора)
Расход теплоносителя через РУ, м <sup>3</sup> /ч	88 000	88 000	88 000
Давление на входе в реактор, МПа		16,54688	16,54688
Давление на выходе из реактора, МПа	16,2±0,3	16,111	16,137
Перепад давления в РУ (без учёта входных и выходных патрубков), кПа		435,88	409,88
Давление на выходе из активной зоны, МПа	16,2±0,3		16,195

### Список литературы:

1. Кириллов П.Л. Основные направления научных исследований в области теплогидравлики атомных энергетических установок (Часть 2) // Теплоэнергетика. 2005. № 5. С. 47-52.
2. Национальный доклад Республики Беларусь о целевой переоценке безопасности (стресс-тесты) Белорусской АЭС. Минск, 2017. 167 с.

УДК 536.6

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ЛИСТА БЕРЕЗЫ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЕРХОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Барановский Н.В., Вяткина В.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Одной из основных причин массовой гибели лесов являются лесные пожары. Число возгораний и их масштаб растут с каждым годом. В связи с этим вопросы борьбы с лесными пожарами становятся актуальными для всех стран с большой площадью лесных массивов. Наиболее эффективным способом предотвращения лесных пожаров является их прогнозирование. Для улучшения качества прогноза целесообразно учитывать особенности поведения типичных лесных горючих материалов, произрастающих на территории прогноза.

В контексте горения лесных горючих материалов обычно выделяют такую последовательность фаз как прогрев и подсушивание образца с выделением водяных паров; высыхание и начало горения с выделением водяных паров и смол; воспламенение газов и пламенное горение, сопровождающееся выделением углекислого газа, дыма, водяных паров и т.д.; обугливание и догорание углей ЛГМ [1].

Изучение процесса термического разложения лесных горючих материалов имеет большое значение при моделировании процессов тепломассопереноса в условиях возникновения и распространения лесных пожаров. Пиролиз сухого органического вещества наряду с горением является ключевым шагом при выделении в окружающую среду летучих соединений и загрязняющих веществ. Поэтому целесообразно изучить закономерности протекания этого процесса у типичных лесных горючих материалов.

В данной работе рассматривается задача тепломассопереноса в элементе типичного лесного горючего материала (листа березы) при воздействии высокотемпературной среды, характерной для условий верхового лесного пожара. При моделировании лист березы рассматривался в виде трехслойной пластины, в которой первый и третий слой представляли собой сухое органическое вещество, а второй слой являлся смесью сухого органического вещества и воды. Моделирование осуществлялось в рамках одномерной и двумерной постановок. При численном моделировании решалось уравнение теплопроводности и кинетическое уравнение с соответствующими начальными и граничными условиями методом конечных разностей [2].

По результатам исследования были получены одномерные и двумерные распределения температур и фаз в образце (см рис.1 и рис.2). Данные распределения позволяют провести количественный и качественный анализ изменений в структуре листа. Отмечено, что процесс пиролиза идет неравномерно во времени и по площади образца. Таким образом, данное исследование позволяет объяснить процессы, протекающие в элементе березового листа в смешанных древостоях при распространении верхового лесного пожара.

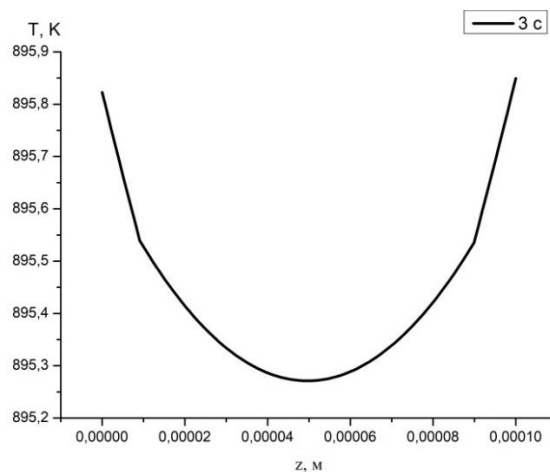


Рис. 1. Распределение фаз по толщине листа берёзы при температуре среды равной 1000 K, времени воздействия 3 секунды, начальной температуре ЛГМ 285 K, коэффициенте теплоотдачи  $\alpha = 40 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

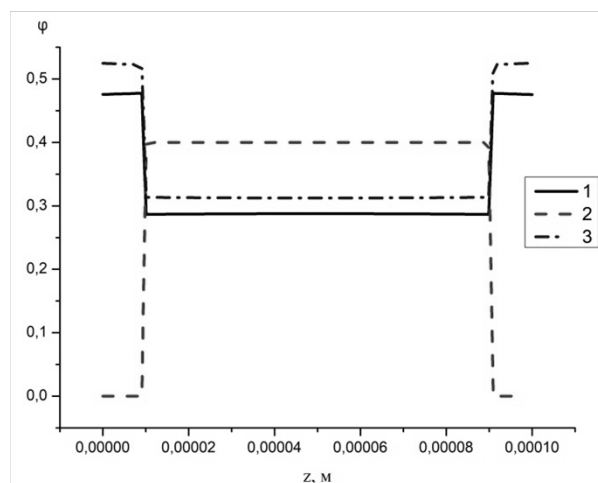


Рис. 2. Распределение фаз по толщине листа берёзы при температуре среды равной 1000 K, времени воздействия 3 секунды, начальной температуре ЛГМ 285 K, коэффициенте теплоотдачи  $\alpha = 40 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ : 1 – сухое органическое вещество, 2 – влага, 3 – газовая фаза.

### Список литературы:

1. Щетинский Е. А. Спутник руководителя тушения лесных пожаров. М: ВНИИЛМ, 2003, 96с.
2. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-31-51001.

УДК 536.24

## RANS МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ОРЕБРЕННОЙ СТЕНКОЙ

Барсуков А.В., Терехов В.В., Терехов В.И.

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

Увеличение интенсификации теплообмена важно как с точки зрения фундаментально понимания процессов физики турбулентного переноса, так и с точки зрения практического применения. Теплообменные аппараты находят широкое применение в промышленности (радиаторы автомобилей, охлаждение микроэлектроники, холодильная промышленность, охлаждающая рубашка для резервуаров). В качестве методов повышения интенсивности теплообмена используются пассивные вихрегенераторы различных форм, например наклонные ребра [1], лунки [2], компланарные каналы [3–5] и т.д. Так использование компланарных каналов позволяет добиться увеличения интенсивности теплообмена в несколько раз, но поскольку оребрены две обе стенки канала такие каналы обладают большим гидравлическим сопротивлением. И в данной работе исследовался теплообмен и структура течения для случая, когда оребрена лишь одна стенка канала при различных числах Рейнольдса и углах ребер относительно набегающего потока

В настоящей работе было проведена серия численных экспериментов турбулентного течения в канале с оребренной стенкой. Число Рейнольдса рассчитывалось по среднерасходной скорости и высоте канала. Угол ребер к набегающему потоку варьировался от  $30^\circ$  до  $90^\circ$ . На рисунке 1 представлена расчетная область (вид сбоку при угле набегания  $90^\circ$ ) в которую входило два ребра. На боковых гранях были заданы циклические грани условия так, что при решении гидродинамической и тепловой задачи границы расчетной области считались периодическими, с учетом потерь давления и подводимого тепла. На стенках же были заданы условия прилипания и постоянный тепловой поток.

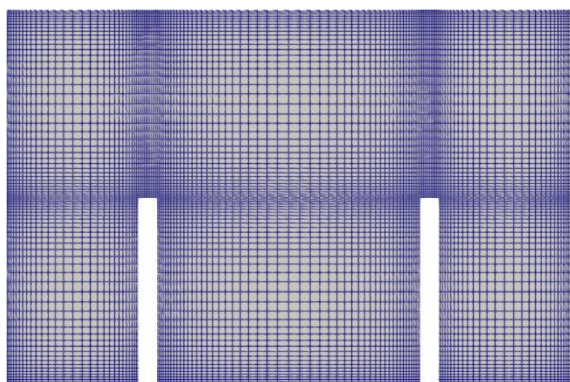


Рис. 1. Схема расчетной области.

Численное моделирование было выполнено методом RANS с использованием SST k- $\omega$  модели. Интегрирование всех уравнений, входящих в математическую модель, проводилось с помощью метода кон-

трольного объема второго порядка точности по пространству в стационарной постановке с использованием решателя simpleFoam из пакета OpenFoam.

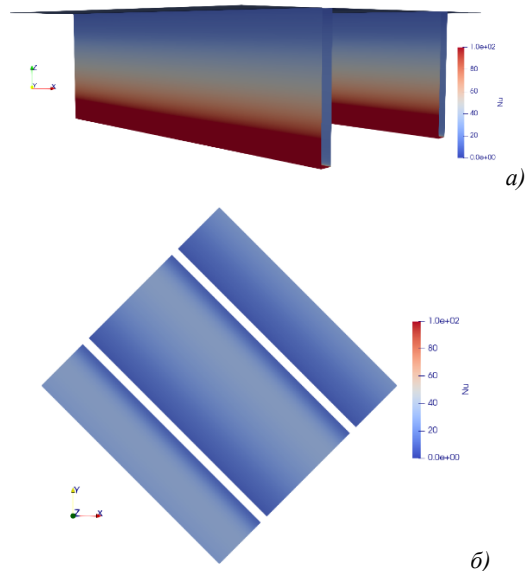


Рис. 2. Распределение числа Нуссельта на стенках канала ( $Re = 10\,000$ ,  $\theta = 45^\circ$ ): а) вид сбоку, б) вид сверху.

В работе представлено подробное численное исследование усиления теплообмена при наличии ребер в канале. Полученные результаты расчетов отрывного обтекания ребер при варьировании угла набегающего потока. Подробно исследованы локальные и интегральные характеристики турбулентного течения. Было получено распределение локального числа Нуссельта (рис 2). Исследован вклад различных частей поверхности теплообменника в повышение теплоотдачи.

### Список литературы:

1. K. Yongsiri, P. Eimsa-ard, K. Wongcharee, S. Eimsa-ard Augmented heat transfer in a turbulent channel flow with inclined detached-ribs// Case Studies in Thermal Engineering 3. P. 1–10.
2. S.A. Isaev, A.I. Leontiev, O.O. Milman, I.A. Popov, A.G. Sudakov Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel// Int. J. Heat Mass Transf. 134 (2019) 338–358. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.175>.
3. Saha K., Acharya S., Nakamata C. Heat transfer enhancement and thermal performance of lattice structures for internal cooling of air-foil trailing edges // J. Therm. Sci. Eng. Appl. 2013 V 5 011001.
4. Oh I. T., Kim K. M., Lee D. H., Park J. S., Cho H. H. Local heat-mass transfer and friction loss measurement in a rotating matrix cooling channel// J. Heat Transfer 2012 V134 011901.
5. Dua W, Luo L, Wang S, Liu J and Sunden B 2019 Heat transfer and flow structure in a detached latticework duct *Applied Thermal Engineering* 155 pp 24-39.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-19-00162).

УДК 621.1.016:532.66:532.62

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ РАСХОДА ЖИДКОСТИ НА ГАЗОЖИДКОСТНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Барткус Г.В., Ковалев А.В., Ягодница А.А.

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

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к работам, направленным на активное управление двухфазными потоками на микромасштабе с целью получения необходимых характеристик течения газ-жидкость или жидкость-жидкость. Один из методов управления — это внешние пульсации расхода фаз, при этом отдельный интерес представляет влияние пульсаций на механизм образования пузырей и характеристики снарядного потока. В работе [1] было обнаружено, что при наложении внешних пульсаций на газовую фазу динамическое давление и напряжение сдвига в Т-образном смесителе увеличиваются с увеличением частоты пульсаций. При этом средняя длина жидких перемычек также увеличивалась. Снарядное течение трансформировалось в волновое при энергии пульсаций, подводимой в систему, достигающей критического значения. Скорость снарядов в такой системе периодически изменялась во времени с частотой равной частоте пульсаций.

В данной работе представлены результаты по комплексному экспериментальному исследованию гидродинамики двухфазного газожидкостного потока в Т-образном микроканале с наложением внешних пульсаций различной амплитуды и частоты на расход жидкости. Эксперименты проведены в микроканале с прямоугольным сечением  $150 \times 390$  мкм для течения смеси 90%(м) этанол-азот. Предварительно проведены эксперименты без наложения пульсаций с целью получения границ режимов течения. В работе использовался синусоидальный профиль расхода жидкости с частотой 1 и 2 Гц с амплитудой расхода 8, 20 и 40% от изначально установленного в экспериментах без пульсаций. Эксперименты были проведены для диапазонов скоростей жидкости и газа  $J_{\text{лиж}}=0.14$  м/с,  $J_{\text{газ}}=0.17-0.54$  м/с, соответствующих периодическому течению удлиненных пузырей. Была выполнена высокоскоростная визуализация течения с последующей обработкой картин течения в программе DMV [2]. При обработке измерялась скорость газового пузыря и его площадь при визуализации сверху, определялась частота следования пузырей.

Анализ проведенных экспериментов показал, что собственные частоты образования газовых пузырей без внешних пульсаций достаточно высоки (рис. 1). Наложение пульсаций малой частоты (1 и 2 Гц) приводит к нарушению периодичности течения и уменьшению частоты пузырей для  $J_{\text{газ}}=0.17-0.28$  м/с, где коалесценции пузырей в потоке не наблюдается, и

снарядный режим является устойчивым. Для значения приведенной скорости  $J_{\text{газ}}=0.54$  м/с, близкой к границе переходного режима течения, где при отсутствии внешних пульсаций образуются длинные пузыри с низкой частотой, наложение пульсаций приводит к увеличению частоты образования пузырей, и в потоке наблюдается их коалесценция. Скорость снарядов периодически изменялась во времени с частотой равной частоте пульсаций.

При наложении внешних пульсаций одинаковой амплитуды, но различной частоты диапазон изменения площади пузырей мало меняется, и медианные значения распределения площадей совпадают для разных частот и амплитуд расхода жидкости.

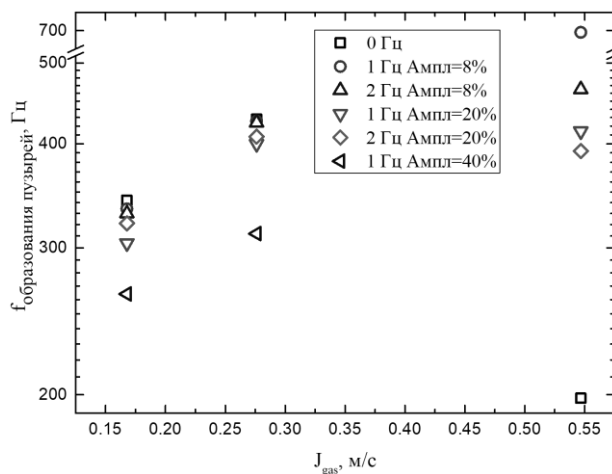


Рис. 1. Влияние частоты и амплитуды внешних пульсаций расхода жидкости на частоту образования пузырей.

Данная работа является частью работы по разработке методов активного управления двухфазными течениями в микроканалах на основе машинного обучения, и ее результаты будут применены при создании методов регуляции потока.

### Список литературы:

- Zhang Y., Zhang J., Tang Z., & Wu Q. Regulation of gas-liquid Taylor flow by pulsating gas intake in micro-channel// Chemical Engineering Journal. 2021. Т. 417, С. 129055.
- Basu A. S. Droplet morphometry and velocimetry (DMV): a video processing software for time-resolved, label-free tracking of droplet parameters //Lab on a Chip. 2013. Т. 13. №. 10. С. 1892-1901.

Исследование выполнено за счет гранта Российского Научного Фонда (РНФ №21-79-10307).



УДК 621.1.016:532.66:532.62

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЬЦЕВОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Барткус Г.В., Кузнецов В.В.

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

Особенностью расслоенного и кольцевого режимов газожидкостного течения в микроканалах является наличие волн различной длины волны и амплитуды, что существенно влияет на межфазное трение [1] и массообмен. Установление характеристик волн в данных условиях имеет большое значение для решения задач тепломассообмена в ряде технологий, и требует детального изучения.

Характеристики межфазных волн зависят от таких параметров, как скорость потока, давление, температура и геометрия канала. Основные виды волн на границе раздела в газожидкостном потоке подразделяются на волны ряби, волны возмущения и большие волны [2]. Волны ряби характеризуются крутым фронтом, малым отношением амплитуды волны к ее длине и малым временем жизни. Они обычно присутствуют на всей границе раздела газ-жидкость, особенно при низких расходах жидкости [3]. Волна возмущения [4] имеет существенно большую скорость, чем волны ряби, и больший интервал между последовательными волнами. Для течения в трубе малого диаметра, волны возмущения выглядят как кольца, покрывающие весь периметр трубы, и расстояние между последовательными волнами составляет несколько диаметров канала. Большие волны имеют большую амплитуду, длину волны и скорость, чем волны возмущения и наблюдаются в сопровождении волн возмущения.

В данной работе проведено экспериментальное изучение характеристик волн возмущения, образующихся на поверхности менисков жидкости в углах прямоугольного канала при расслоенном и кольцевом режимах течения. Эксперименты проведены для спутного газожидкостного течения азот-этанол в прямоугольном канале с сечением  $190 \times 380$  мкм, расположенном горизонтально. Расход фаз регулировался контроллерами Bronkhorst. Газообразный азот подавался в прямой микроканал, а жидкость поступала через боковой смеситель перпендикулярно основному потоку газа.

Получено, что для газожидкостного течения в микроканале наблюдаются волны на межфазной поверхности искривленной формы при доминировании сил инерции над капиллярными силами. В прямоугольной геометрии канала, которая наиболее используется для практического применения, формируется неравномерное распределение жидкости: области с тонкой пленкой и мениски в углах канала, что обуславливает отличие характеристик волн в данных областях.

На рис. 1 приведена высокоскоростная визуализация расслоенного режима течения при приведенной скорости жидкости  $J_{liq}=0.1$  м/с и приведенной скорости газа  $J_{gas}=13.7$  м/с (а), и кольцевого течения при  $J_{liq}=0.1$  м/с,  $J_{gas}=82$  м/с (б), направление течения показано стрелкой. Как видно, при расслоенном режиме

течения, см. рис. 1(а), наблюдаются волны возмущения в мениске жидкости на короткой стороне микроканала. При увеличении приведенной скорости газа амплитуда волн на поверхности мениска возрастала, и происходил заброс жидкости на длинную сторону канала с образованием кольцевого режима течения, показанного на рис. 1(б).

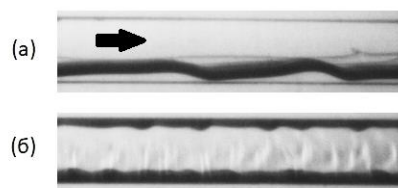


Рис. 1. Высокоскоростная визуализация расслоенного режима течения при  $J_{liq}=0.1$  м/с  $J_{gas}=13.7$  м/с (а) и кольцевого течения при  $J_{liq}=0.1$  м/с  $J_{gas}=82$  м/с (б), направление течения показано стрелкой.

С помощью высокоскоростной визуализации были получены области существования кольцевого и расслоенного режимов течения и произведена обработка полученных данных, измерено давление на входе в микроканал. Установлены зависимости средней толщины слоя жидкости и амплитуды волн на поверхности мениска на короткой стороне микроканала от приведенной скорости газа для различных скоростей жидкости. Показано, что рост приведенной скорости газа вызывает уменьшение средней толщины слоя жидкости. С увеличением приведенной скорости газа возрастает количество жидкости, вытесняемой из области мениска в пленку жидкости на широкой стороне микроканала.

Полученные результаты о волновых характеристиках течения этанол-азот являются важными при решении задач тепломассообмена, так как они определяют интенсивность поперечных течений в микроканале.

## Список литературы:

1. Hewitt G. Annular two-phase flow / 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.

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

УДК 533.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ В ПЛАЗМЕ С СИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Батрак Н.В.<sup>1</sup>, Копалейшвили Н.Г.<sup>1</sup>, Кузенов В.В.<sup>1,2</sup>, Рыжков С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
105005, Россия, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1

<sup>2</sup> ВНИИА им. Н.Л. Духова,  
127030, Россия, Москва, Сущевская ул., д. 22

Благодаря частицам высоких энергий термоядерных реакций возможна генерация нейтронного и рентгеновского излучения, могут протекать реакции ядерного синтеза, в которых рождаются частицы еще более высоких энергий (например, протоны с энергией 14 МэВ), использование которых возможно в ряде прикладных технологий для медицины, безопасности и утилизации ядерных отходов.

Поддержание плазмы в сильно неравновесном состоянии требует очень мощного драйвера (источника энергии нагрева), и поэтому не стоит рассчитывать на то, что такая плазма обеспечит выход энергии, сильно превосходящий энергию драйвера. Однако, следует подчеркнуть, что конверсия энергии драйвера в энергию пучков и излучений из плазмы имеет очень высокую эффективность по сравнению, например, с классическими ускорительными системами. Также такая плазма, генерирующая нейтроны мегаэлектронвольтового диапазона сама может являться драйвером подкритичной ядерной системы, в которой (в цепочках превращений, запускаемых этими нейтронами) нарабатывается ядерное топливо и одновременно утилизируются отходы ядерного топливного цикла. Такая симбиотическая система «синтез–деление» достигает по выходу энергии уже многократного усиления.

Рассмотрены и другие приложения реакций синтеза – например, в качестве источника нейтронов, когда не требуется поддерживать «тепловое» состояние горячей плазмы, как это предполагается в концепции реактора. Отсутствие требования по превышению выхода энергии над вкладом позволяет создавать сильно неравновесную «нетепловую» плазму с большой долей высокоэнергетичных компонентов, инициировать реакции синтеза и частично «окупать» энергозатраты на поддержание неравновесного состояния.

В работе представлен обзор статей по генерации мощных потоков частиц и излучений высоких энергий в неравновесной плазме с сильным магнитным полем [1–10]. Особое внимание уделено источнику нейтронов и концепции магнитно-инерциального термоядерного синтеза, основанной на обжатии замагниченной мишени лазерными пучками или высокоскоростными плазменными струями.

В частности, излагается предложение по созданию комбинированной схемы магнитно-инерциального термоядерного синтеза (см. рис. 1). Плазменные или лазерные струи (интенсивные источники излучения) поступают вдоль образующей цилиндрической поверхности мишени включаются после того лазерного излучения, вводимого через торцевую часть мишени.

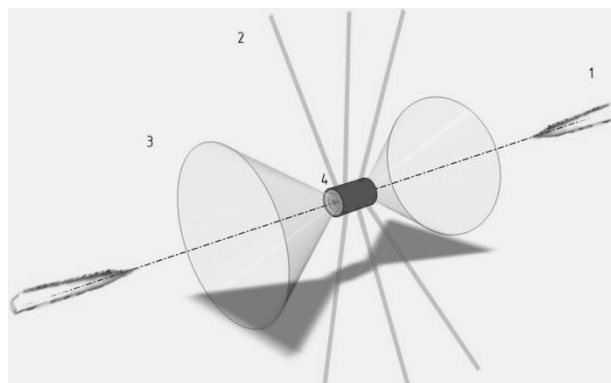


Рис. 1. Комбинированная схема магнитно-инерциального термоядерного синтеза: 1 – лазерные пучки, 2 – мощные плазменные или лазерные струи, 3 – конус, 4 – плазменная мишень.

Результаты собственных исследования базируются на созданных при активном участии авторов моделях для исследования радиационных потерь, кинетики термоядерных продуктов, кинетики вторичных реакций, аномального переноса частиц и энергии в магнитном поле и других процессов.

### Список литературы:

1. Гаранин С.Г., Ивановский А.В., Куликов С.М., Мамышев В.И., Певный С.Н., Рогачев В.Г. Инерционный термоядерный синтез с применением взрывомагнитных генераторов // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 131-140.
2. Yager-Elorriaga D.A. et al. An overview of magneto-inertial fusion on the Z machine at Sandia National Laboratories // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. P. 042015.
3. Кузенов В.В., Лебо А.И., Лебо И.Г., Рыжков С.В. Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 328 с.
4. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: Физматлит, 2017. 200 с.
5. Клименко Г.К., Кузенов В.В., Ляпин А.А., Рыжков С.В. Учебник: Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 264 с.
6. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Estimation of the neutron generation in the combined magneto-inertial fusion scheme // Physica Scripta. 2021. V. 96. P. 125613.
7. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Calculation of plasma dynamic parameters of the magneto-inertial fusion target with combined exposure // Physics of Plasmas. 2019. V. 26. P. 092704.
8. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Численное моделирование взаимодействия мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза с плазменным и лазерным драйверами // ТВТ. 2021. Т. 59, № 4. С. 492–501.
9. Murakami M., Honrubia J.J., Weichman K., Arefiev A.V., Bulanov S.V. Generation of megatesla magnetic fields by intense-laser-driven microtube implosions // Scientific Reports. 2020. V. 10. P. 16653.
10. Moody J.D., Pollock B.B., et al The Magnetized Indirect Drive Project on the National Ignition Facility // Journal of Fusion Energy. 2022. V. 41. P. 7.

УДК 532.5

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПОРОШКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ЧАСТИЦ В КОАКСИАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ****Беденко Д.В., Ковалев О.Б., Сергачев Д.В.**Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Прямая лазерная наплавка материала (DMD) – это технология производства новых деталей, нанесения покрытий, для которых требуется транспортировать большое количество порошка с высокой точностью доставки. При высоких расходах порошка (50–100 г/мин) взаимодействие между потоком газа и порошка, а также столкновения между частицами оказывают значительное влияние на фокусировку порошковой струи. Для изучения эффекта влияния большого количества частиц в области их фокусировки (объемная доля 1–10%) проведено численное исследование формируемых двойным коаксиальным соплом газопорошковых течений в зависимости от расходов подаваемого порошка. Расчеты дополнены и верифицированы экспериментальными данными.

В лазерной наплавке скорости газа обычно составляют несколько десятков метров в секунду, поэтому для его описания удобно использовать уравнения Навье-Стокса в приближении несжимаемой жидкости. Траектории частиц порошка определяются на основе второго закона Ньютона для каждой отдельной частицы в переменных Лагранжа [1]. Взаимодействие между порошком и газом выражается через дополнительный член в правой части уравнения для импульса, – аэродинамическую силу сопротивления. Соударения частиц между собой описываются по модели жестких сфер с введением коэффициентов восстановления скорости после удара для нормальной и тангенциальной компонент [2]. Значения коэффициентов определяются экспериментально или из литературы.

Физико-математическая модель была реализована на базе пакета с открытым исходным кодом OpenFOAM. В рамках него использовался решатель DPMFoam для одновременного расчета газодинамических потоков и траекторий частиц. Их движение моделировалось на основе авторской реализации метода жестких сфер, которая использовалась для определения скоростей частиц после соударений между собой (двойные соударения). Уравнения газовой динамики решались методом PIMPLE, который комбинирует в себе два подхода: PISO и SIMPLE. Расчет траекторий частиц производился интегрированием уравнения движения частиц по алгоритму leapfrog.

Во всех расчетах и экспериментах рассматривался (использовался) стальной порошок ПР-Х18Н9 сферической формы с размерами от 40 до 80 мкм. Эксперименты включали в себя измерение массы частиц попавших в трубку-катетер заданного диаметра (4 мм), который собирался в открытую емкость и затем взвешивался. Катетер сдвигался на разное расстояние от

сопла по его оси. Измерения проводились для разного расхода порошка с целью изучения влияния его расхода на фокусировку порошковой струи. Данные экспериментов использовались, в первую очередь, для верификации численных расчетов.

Численное моделирование включало в себя расчеты внутренней геометрии двойного коаксиального сопла, а также истечение газопорошковой струи в открытое пространство. При заданных расходах газа: транспортирующего (5 л/мин) и защитного (5 л/мин) варьировались расходы порошка (10–100 г/мин) для того, чтобы обеспечить различную концентрацию частиц в струе. В результате было зафиксировано значительное замедление газодинамической струи в области фокусировки порошка, практически до скоростей самих частиц, объемная доля которых составляла при высоких расходах около 10%. В данной области наблюдается заметное изменение их траекторий из-за частых парных соударений, – ниже фокуса угол расширения порошковой струи заметно уменьшается и становится более равномерным. Варьирование расходов порошка показало, что там, где объемная доля частиц превышает 0.5%, следует учитывать их обратное влияние на газ и взаимодействие частиц между собой.

Сравнение экспериментальных и численных данных в широком диапазоне расходов показало приемлемое соответствие. Наилучшее совпадение получено при больших расходах порошка 75–100 г/мин, которое ухудшается при малых расходах. Это может объясняться отсутствием влияния на решение задачи граничных условий для скоростей частиц на входе в сопло, которые заранее неизвестны. Вследствие столкновений частиц друг с другом и замедления течений в газе для функции распределения скоростей частиц успевают установиться новое распределение. Проведенное сравнение демонстрирует адекватность выбранной физико-математической модели и ее численной реализации для описания газодинамических процессов, происходящих при транспортировке большого количества порошка с помощью коаксиального сопла в методе DMD.

## Список литературы:

1. Cundal P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // *Geotechnique*. 1979. V. 29. No 1. P. 47-65.
2. Multiphase flows with droplets and particles / C.T. Crowe, J.D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, Y. Tsuji. 2nd. edit. Boca Raton, CRC Press, 2011. 509 p.

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 18-19-00430,  
<https://rscf.ru/project/18-19-00430>*

УДК 532.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ НА ПРИМЕРЕ ИМИТАТОРОВ РАСПЛАВА СОЛЕЙ

Белавина Е.А.<sup>1,2</sup>, Пятницкая Н.Ю.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1  
belavinaea@gmail.com

На сегодняшний день всё острее встает вопрос о переработке топливных отходов. Решением в этой области стала стратегия проекта ядерных систем IV поколения, направленная на создание реакторных установок с устойчивым к высоким температурам ядерном топливом, которое способно обеспечить удержание всех минорных актинидов, полностью замкнув топливный цикл. В качестве одной из таких систем была выбрана концепция жидкосолевого реактора (MSR), принцип которого заключается в генерации энергии за счет реакции деления при надтепловом спектре нейтронов, с циркуляцией теплоносителя и топлива в виде смеси расплавленных солей и полным выжиганием минорных актинидов [1].

В связи с этим, комплексное исследование, состоящее из изучения свойств перспективных расплавов фторидных солей, а также создание надежной экспериментальной и численной базы для верификации инженерных расчетов, представляют особый интерес. Работа в этой области ведется коллективом авторов НИУ «МЭИ»-ОИВТ РАН.

Целью данной работы являлось изучение особенностей объемного тепловыделения, применительно к условиям гомогенной активной зоны жидкосолевого реактора посредством модельного эксперимента и численного расчета.

На начальном этапе был сделан анализ имеющейся литературы [2-4], который показал актуальность дальнейшего исследования. Далее проведена серия тестовых экспериментов по подбору кандидатных жидкостей с схожими с реальными теплоносителями теплофизическими свойствами. В качестве модельных жидкостей рассматривались водные растворы  $ZnSO_4$ ,  $MgSO_4$ ,  $K_2SO_4$ ,  $CuCl$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $NaCl$ ,  $KOH$  с массовой концентрацией в 3, 4, 20 и 30 процентов.

Для изучения особенностей естественной конвекции в условия внутренних источников тепловыделения, имитирующих поток нейтронов активной зоны, был создан экспериментальный стенд, состоящий из тестовой ячейки и медных платин, пропускание тока через которые моделировало объемное тепловыделение (см. рис. 1). Максимальная тепловая нагрузка, реализуемая в эксперименте, составила  $800 \text{ кВт/м}^3$ .

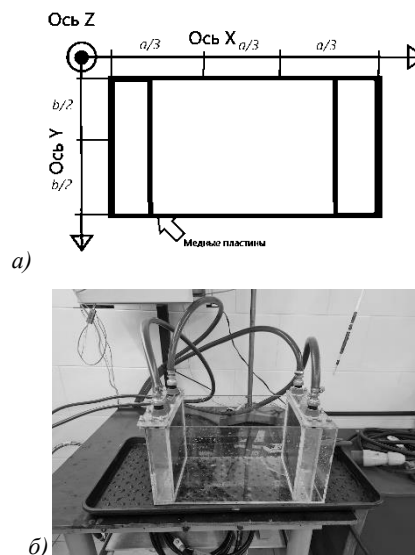


Рис 1. а) постановка задачи; б) экспериментальная установка.

В ходе работы была выявлена сильная зависимость электропроводности от температуры, что может привести к неоднородности тепловыделения и получению в дальнейшем сложной картины течения. Были построены распределения поля потенциала и температурного поля для исследуемых жидкостей, которые показали, монотонно растущую зависимость значений электропроводности от температуры и однородность поля разности потенциалов. Наиболее перспективным вариантом в этом случае являлся раствор КОН.

На основе полученных экспериментальных данных проведено численное моделирование. Стратификация температуры в ячейке порождает естественную конвекцию и вызывает неоднородность по всей области тепловыделения. Отношение скорости нагрева к температуре жидкости сравнивается с числом Нуссельта конвекции Рэлея–Бенара. Полученные результаты качественно совпадают между собой.

### Список литературы:

1. International atomic energy agency, Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, Nuclear Energy Series, 2022
2. Papanicolaou E. Mixed convection from an isolated heat source in a rectangular enclosure //Numer. Heat Transf. A.1991. Т. 18. №. 4. С. 427–461.
3. Генин Л.Г. Исследование теплообмена при наличие в потоке жидкости внутренних источников тепла/Докторская диссертация.
4. Goluskin D. Penetrative internally heated convection in two and three dimensions // J. Fluid Mech.. 2016. Т. 791.

УДК 536.24

## КИПЕНИЕ ВОДЫ И РАСТВОРОВ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРО- И МИНИКАНАЛАХ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ НАГРЕВЕ СО СТОРОНЫ СТЕНКИ

Белослудцев В.В., Зайцев Д.В.

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

Кипение является одним из самых эффективных и простых методов теплоотвода высоких тепловых потоков. Кипение достаточно широко изучено в большом объеме [1] и активно ведется исследование проточного кипения в каналах [2]. Актуальность исследования проточного кипения в микро-каналах связана с задачами охлаждения электронного и микроэлектронного оборудования. Экспертами полупроводниковой промышленности в международном плане по развитию полупроводниковых технологий [3] обозначена проблема охлаждения микроэлектронного оборудования при высоких и сверхвысоких тепловых потоках с неоднородным тепловыделением. Данная проблема является одним из основных препятствий для создания нового поколения высокопроизводительных процессоров с трехмерной интеграцией.

В работе выполнены систематические исследования динамики пузырей и теплообмена при кипении в мини- и микроканалах высотой от 0,2 до 3 мм при различном недогреве рабочей жидкости. Эксперименты проводились при различных размерах нагревателя со стороны стенки 3 и 10 мм в двух основных конфигурациях – с однородным нагревом (ширина потока совпадает с шириной нагревателя) и с неоднородным нагревом (ширина потока рабочей жидкости больше ширины нагревателя). Также было изучено кипение растворов ионных жидкостей в условиях аналогичных кипению чистой воды.

Установлено, что высота канала оказывает существенное влияние на теплообмен при кипении. Это можно проиллюстрировать разбросом кривых кипения в каналах малой высоты, например в канале высотой 0,32 мм, Рис. 1 (б). Кривые кипения в канале высотой 2 мм, Рис. 1(а), хорошо согласуются между собой вплоть до кризиса теплообмена при кипении. Этот разброс (т.е. переход от режима пузырькового кипения к неустойчивому пульсационному режиму при низких значениях теплового потока) имеет тенденцию к увеличению с уменьшением высоты канала.

Критический тепловой поток в канале с однородным нагревом уменьшается с уменьшением высоты канала. Аналогичная зависимость критического теплового потока от высоты канала также наблюдается для случая неоднородного нагрева. Данные по критическому тепловому потоку в канале с однородным нагревом сопоставлены с данными для случая неоднородного нагрева, в зависимости от высоты канала; стоит отметить, что зависимость от массового расхода воды  $G$  ( $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$ ) одинакова для обоих типов каналов, как показано на Рис. 2. Характер зависимости от высоты канала для разных типов каналов, несколько отличается, что связано с влиянием гидродинамики течения на критический тепловой поток.

В докладе будут представлены результаты исследования кипения в каналах с однородным и неоднородным нагревом для воды, растворов ионных жидкостей, а также диэлектрической жидкости HFE-7100. Так же будут представлены данные по визуализации процесса кипения и динамики пузырей с частотой съемки до 775 000 кадров в секунду.

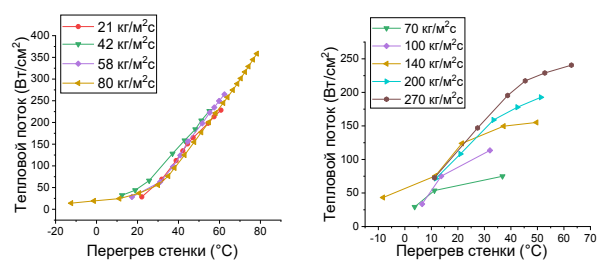


Рис. 1. Кривые кипения в плоском канале с неоднородным нагревом. Вода, размер нагревателя  $10 \times 10$  мм, высота ×канала 2 мм (а) и 0,32 мм (б).

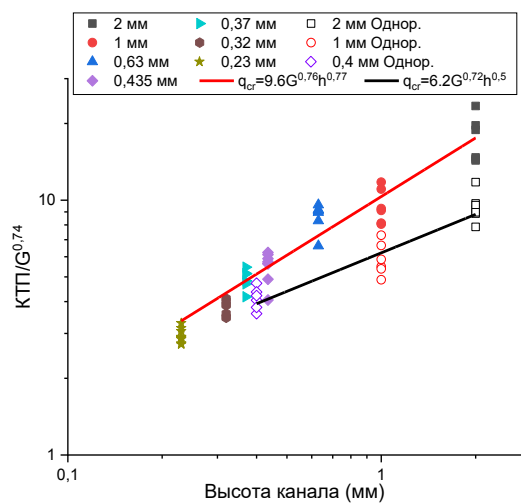


Рис. 2. Влияние высоты канала на критический тепловой поток (КТП) для однородного (обозначено в легенде - Однор.) и неоднородного нагрева. Вода, размер нагревателя  $10 \times 10$  мм.

### Список литературы:

- Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М. Атомиздат, 1979, 416 с.
- 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.
- International Roadmap for Devices and Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021 // [Электронный ресурс] - <https://irds.ieee.org/editions>.

УДК 621.019

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В МИНИКАНАЛЕ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Беляев А.В., Сидельников Н.Е., Дедов А.В.

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

В работе выполнено экспериментальное исследование теплообмена в вынужденном потоке кипящего фреона R125 в канале малого диаметра с модифицированной поверхностью при высоких приведенных давлениях. Представлен метод модификации внутренней поверхности канала.

В современной технике продолжают активно развиваться и внедряться высокоэффективные теплообменные устройства с микросканалами. Для охлаждения элементов микроэлектронной техники в качестве теплоносителя могут использоваться различные диэлектрические жидкости и хладоны, для которых необходимый уровень теплового потока достигает 2-5 МВт/м<sup>2</sup>. Обеспечить необходимую плотность теплового потока возможно с использованием фазовых переходов охлаждающей жидкости и дополнительной интенсификации теплообмена.

В настоящее время широко исследуется вопрос о модификации внутренней, или внешней поверхности труб с целью интенсификации теплоотдачи [1]. Подобные исследования являются одними из наиболее востребованных направлений в теплофизике и теплотехнике. На данный момент разработано множество различных методов, таких как:

- МДР – методы деформирующего резания;
  - многослойные сеточные покрытия с градиентной пористостью;
  - различные способы создания наношероховатостей;
  - метод комбинированной модификации (одновременное использование МДР и наномодификации).
- Известные механические способы обработки и новейшие методы структурирования поверхностей позволяют достигать значительных результатов по интенсификации теплообмена [2]. Часть из представленных методов удается реализовать внутри «обычных» труб, что является технически непростой задачей. Целью данной работы является попытка создания простого метода модификации внутренней стенки микросканала с диаметром  $d \approx 1$  мм.

В докладе представлено описание экспериментального стенда, метода модификации внутренней стенки микросканала, показаны опытные данные о коэффициенте теплоотдачи, КТП, гидродинамике и кривые кипения. Данные получены на одной трубке из нержавеющей стали до модификации и после. Эксперименты проводились при вынужденном течении фреона R125 в вертикальном канале диаметром 1,1, длиной 50 мм, при двух значениях приведенного давления по отношению к критическому 0.43 и 0.56. Массовый расход теплоносителя изменялся в диапазоне  $G=200 \div 1200$  кг/м<sup>2</sup>с. Температура поток на входе в рабочий участок была близка к комнатной. В ходе экспериментов измерялись значения температуры входа

и выхода, температуры стенки в 5 сечениях по длине рабочего участка, давление, перепад давления и расход. Измерения выполнялись с помощью автоматизированной системы сбора данных при установлении стационарного режима.

Данные о гидродинамике, полученные в канале после модификации показали незначительное увеличение потерь давления. Интенсивность теплообмена за счет конвекции осталась на уровне канала до модификации. В свою очередь данные о теплоотдаче при кипении в канале после модификации показали увеличение коэффициента теплоотдачи до 30%. Увеличение КТП составило в среднем 10% при  $G \approx 1000$  кг/м<sup>2</sup>с.

Модификация внутренней стенки канала осуществлялась с помощью воздействия лазерного импульса на внешнюю поверхность стенки канала. После воздействия на внутренней стенке образовывалось наплавление разной высоты и диаметра в зависимости от мощности излучения. Были получены различные образования в зависимости от мощности лазерного импульса. В данной работе модификация канала была выполнена с использованием лазерного импульса с током  $I=130$  А. На рис. 1 показан результат такого воздействия. Диаметр образования получился  $d=390$  мкм. По всей длине рабочего участка были нанесены с большой плотностью наплавления на внутренней стенке в количестве 300 штук (6 рядов по 50 образований в каждом, в шахматном порядке).

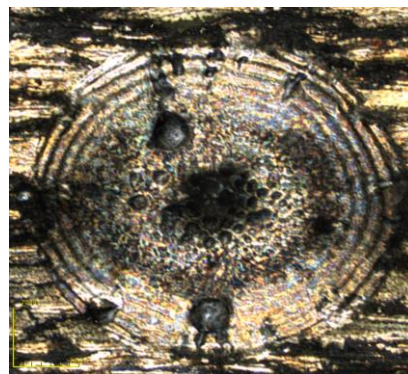


Рис. 1. Фотография образования в результате воздействия лазерного импульса  $I=130$  А,  $d=390$  мкм.

### Список литературы:

1. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях, January 2021 *Теплофизика Vysokikh Temperatur* 59(2) : 280–312.
2. Jaikumar A., Kandlikar S.G. Ultra-High Pool Boiling Performance and Effect of Channel Width with Selectively Coated Open Microchannels // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016. V. 95. P. 795.

*Работа выполнена при поддержке Российского  
Научного Фонда 19-19-00410.*

УДК 536.24

## ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА С ЧИСЛОМ ПРАНДТЛЯ $Pr=40$ И ТЕПЛООБМЕНА В МЕТОДЕ ЧОХРАЛЬСКОГО

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

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

Классический вариант метода Чохральского до настоящего времени остается основным методом получения высококачественных монокристаллов из расплавов для микроэлектроники и лазерной техники. Получение качественных бездислокационных монокристаллов является сложной многопараметрической задачей. Управление параметрами технологических процессов и поиск оптимальных технологических режимов зависит в первую очередь от уровня понимания сути процессов тепло- массообмена в тигле с расплавом. Режимы течения расплавов и зависящие от них радиальные распределения локальных тепловых потоков на фронте кристаллизации определяют качество получаемых монокристаллов и наличие в них напряжений. Для выбора оптимальных технологических параметров управления процессом выращивания монокристаллов необходимо правильно оценивать относительный вклад массовых и капиллярных сил в формирование структуры течения расплава вещества.

В методе Чохральского свободная конвекция, возникающая из-за перепада температуры между фронтом кристаллизации и стенками ростовой установки, неустранима, и ей почти невозможно управлять [1–4]. Одним из эффективных способов управления гидродинамикой и конвективным теплообменом в тигле является подбор угловой скорости вращения кристалла, управляя этим параметром можно получать почти равномерные распределения локальных тепловых потоков на фронте кристаллизации.

Наиболее эффективным подходом исследования данных процессов является сочетание физического и численного моделирования. Такой подход был использован в данной работе.

Численные исследования выполнены методом конечных разностей, использовалась программа с собственным кодом. Была исследована ламинарная тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в стационарных режимах, влияние высоты расплава на структуру течения, локальные и интегральные тепловые характеристики в режимах  $1.1 \leq H/R_T \leq 2.0$ ,  $R_T/R_K = 1.94$ ,  $Pr = 40.4$ ,  $Re = 95$ ,  $Gr = 1214$ ,  $Ma = 2932$ . Число Прандтля соответствует расплавам щелочно-галогидных кристаллов. Построена аналитическая аппроксимация интегрального числа Нуссельта в зависимости от высоты расплава.

Экспериментально изучено влияние конвективного теплообмена на форму фронта кристаллизации гептадекана с  $Pr = 40.4$ . Экспериментально изучен конвективный теплообмен на физической модели метода Чохральского.

Проведены исследования эволюции пространственной формы течения с ростом перепада температуры в системе при фиксированном значении высоты слоя расплава  $H/R_T = 0.7$  и размера кристалла  $R_T/R_K = 1.94$ , при заданном числе Рейнольдса  $Re = 95$ . Найдены режимы с наиболее равномерным распределением локального теплового потока на фронте кристаллизации. Результаты расчетов обобщены в виде зависимости числа Нуссельта  $Nu$  ( $Gr$ ) (рис.1). Режим течения становится нестационарным при перепаде температуры соответствующем  $Gr = 6314$  и  $Ma = 15247$ . Число Нуссельта резко изменяется, что является следствием перестройки пространственной формы течения расплава и локальных тепловых потоков на фронте кристаллизации.

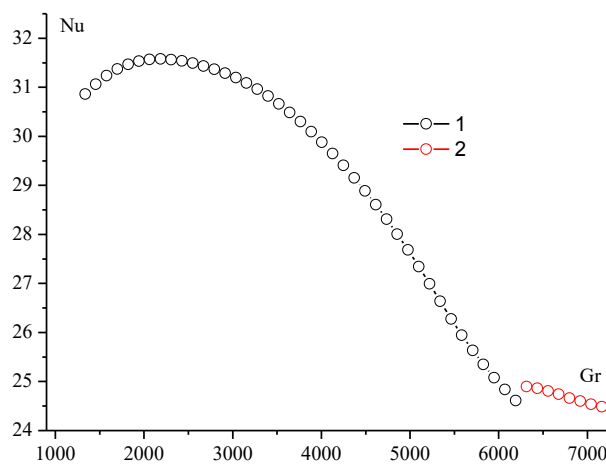


Рис. 1. Зависимость числа Нуссельта от числа Грасгофа в режимах смешанной конвекции при: 1 – стационарные режимы, 2 – нестационарные режимы..

### Список литературы:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса // Полежаев В.И., Бунэ А.В. и др.; М.: Наука, 1987. 272 с.

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

УДК 533.9.01

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПРИМЕСЕЙ ОТ ЦЕМЕНТНОГО ЗАВОДА ЛАГРАНЖЕВЫМ МЕТОДОМ

Бобров М.С., Хребтов М.Ю.

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

Моделирование эволюции динамики атмосферного пограничного слоя (АПС) очень ресурсоемко из-за больших масштабов расчетных областей и типичного временного интервала моделирования. Если требуется рассмотреть несколько сценариев распространения примеси от разных источников и для примесей с разным составом, то потребуется серия таких расчетов. По этой причине возникает необходимость отделить аэродинамическую задачу от задачи о распространении примеси. При таком подходе единожды проведенное моделирование эволюции АПС над городом можно многократно использовать для разных конфигураций источников примесей. Лагранжев подход позволяет описать примесь как набор дискретных частиц. Такой подход позволяет учесть влияние инертности частиц и различной скорости их осаждения. При таком подходе статистика частиц восстанавливается лучше, чем при эйлеровом; в частности, удается воспроизвести эффекты кластеризации частиц в поле турбулентных пульсаций [1].

В данной статье представлены результаты моделирования распространения дисперсной примеси от цементного завода в городе Искитим в зимний период при малой амплитуде геострофического ветра. Наличие локализованных источников загрязнения позволяет исследовать применимость модели распространения примеси (поскольку источник точно известен) путем сравнения результатов с наблюдениями за экологической обстановкой на местности.

Для моделирования распространения примесей в воздухе и их осаждения на поверхности земли методом Лагранжа была реализована программа на языке C++. Примесь разбивалась на группы частиц с одинаковыми характеристиками (плотность, диаметр), каждая из которых моделировалась одной частицей. Для каждой моделируемой частицы решалось следующее эволюционное уравнение:

$$\vec{r}_p(t + dt) = \vec{r}_p(t) + \left[ \vec{U}(\vec{r}_p, t) + \vec{u}_g + \vec{u}(\vec{r}_p, t) \right] dt,$$

где  $U$  - усредненная за время шага по времени скорость воздуха вблизи частицы,  $u_g = d^2g(\rho_p - \rho_g)/18\eta$  – скорость осаждения частиц в пределе малых чисел Рейнольдса,  $u$  – скорость турбулентных пульсаций, моделируемая из уравнения стохастического процесса [2]:

$$d\left(\frac{u_i}{\sigma_i}\right) = -\frac{u_i}{\tau_L \sigma_i} dt + \sqrt{\frac{2}{\tau_L}} dW_i + \frac{d\sigma_i}{dx_i} dt,$$

$$\sigma_i = \sqrt{\langle u_i' u_i' \rangle}$$

$$\tau_L = (0.5 + 0.75C_0) \frac{z}{k}$$

В качестве входных параметров программа принимала трехмерные данные о полях скоростей, усредненных по времени между итерациями, турбулентные пульсации и масштаб времени турбулентности. Такие данные были сохранены в предварительном

LES расчете динамики АПС. В качестве объекта для тестирования модели была выбрана техногенная примесь, образующаяся на цементном заводе в городе Искитим. В качестве источника примеси была выбрана заводская труба. Генерация частиц осуществлялась непрерывно на протяжении всего моделирования с фиксированной интенсивностью.

Для получения более подробной информации о характере распространения и осаждения частиц было предложено моделировать случаи без геострофического ветра и со средней скоростью ветра у поверхности 1 м/с. В качестве плотности частиц использовали плотность цемента. Для изучения характера осаждения частиц в окрестностях города было предложено провести несколько расчетов для одних и тех же полей аэродинамического течения, но с разными размерами частиц. В результате предварительных расчетов установлено, что частицы радиусом более 30 мкм осаждаются на расстоянии нескольких сотен метров от источника, а частицы радиусом менее 3 мкм уносятся потоком за пределы расчетной области. Сравнение данных о концентрации осаждающихся частиц с наблюдениями на местности [3] (рис. 1) показывает хорошее совпадение с наблюдениями, что свидетельствует об адекватности применяемой модели.

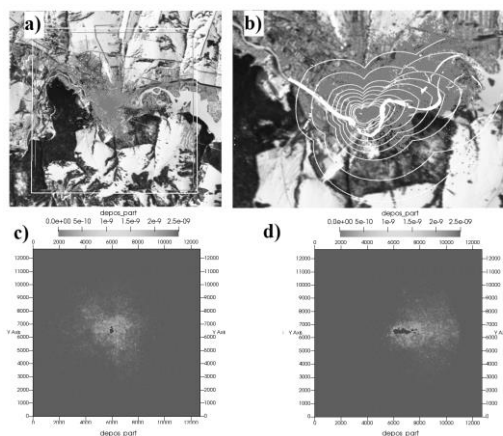


Рис. 1: (a, b) мгновенные положения частиц для случаев без ветра (a) при средней скорости ветра 1 м/с (б). Радиус частиц 12 мкм, белые линии — данные наблюдений [3]; c, d – распределение концентрации осажденных частиц размером 6 мкм для случаев без ветра (c) при средней скорости ветра 1 м/с (d).

### Список литературы:

1. Alabyan A. M. et al; Informatics and Automation, 41: 5-33. 2015.
2. River-induced anomalies in seasonal variation of traffic-emitted codistribution over the city of krasnoyarsk./ M Hrebtov and K Hanjali c.; Atmosphere, 10(7):407, 2019
3. Stochastic lagrangian simulation of particle deposition in turbulent channel flows./ D. P. Sikovsky.; Flow, Turbulence and Combustion, 95(2):561–582, 2015.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.



УДК 662.76

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕССЫ КИСЛОРОДНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Божеева Д.М.<sup>1</sup>, Кузнецов В.А.<sup>1,2</sup>, Дектерев А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,

660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Современные тенденции сокращения эмиссии парниковых газов привлекли внимание к низкоуглеродной энергетике. При сжигании угольного топлива производится наибольшее количество углекислого газа на единицу выделяемой энергии, в сравнении с природным газом и нефтью [1]. Стоит также учитывать, что доля угля в энергетике весьма большая. Не маловажной отраслью связанной с повышением углеродного следа является производство стали и цемента, так как там используется угольное топливо [2].

Решением экологических проблем могут послужить перспективные технологии по переработки угольного топлива. Удаление азота из воздуха перед сжиганием или газификацией топлива способствует в дальнейшем более простому улавливанию  $CO_2$ . В таком случае окисление или газификация топлива протекает в среде  $O_2-CO_2-H_2O$ . Среди разрабатываемых технологий по сокращению выбросов  $CO_2$  на теплоэлектростанциях большие надежды подает газификация твердого топлива.

В настоящей работе проведено численное моделирование кислородной газификации угольного топлива в потоке с целью исследования влияния режимных параметров на процессы в реакционной камере и состав генераторного газа.

Для проведения исследований был выбран цилиндрический газификатор лабораторного масштаба (рис. 1). В центральном канале подаётся измельчённый уголь и окислитель. В кольцевом канале подаётся пар с температурой 450 К [3].

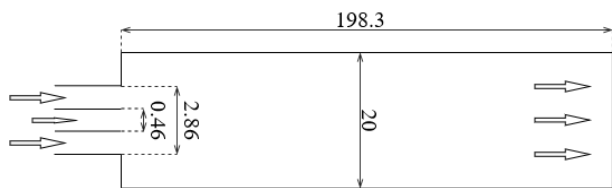


Рис. 1. Схема газификатора (размеры в см).

Для моделирования пространственного турбулентного течения и процессов окисления/газификации использовалась комплексная физико-химическая математическая модель. Движение несущей среды описывалось с помощью осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замкнутых при помощи  $k-\omega$  SST модели. Для описания лучистого теплообмена была выбрана модель  $DO$  (*discrete ordinates radiation model*), поскольку дает хорошие результаты при решении задач радиационной газовой динамики. Коэффициент поглощения основан на модели взвешенной суммы серых газов. Метод Лагранжа использовался для описания движения угольных частиц. Модель выхода летучих –  $CPD$  (*chemical percolation devolatilization model*). Описание

газового горения основано на модели  $EDC$  (*eddy-dissipation concept*). Горения и газификации твёрдого углерода описывается в соответствии с положениями классической диффузионно-кинетической теории. Исследование выполнено на программном пакете *ANSYS Fluent*.

В серии расчётов была протестирована предложенная комплексная математическая модель процессов газификации угольного топлива. Сравнение расчета с экспериментальными данными показало хорошее соответствие (рис. 2).

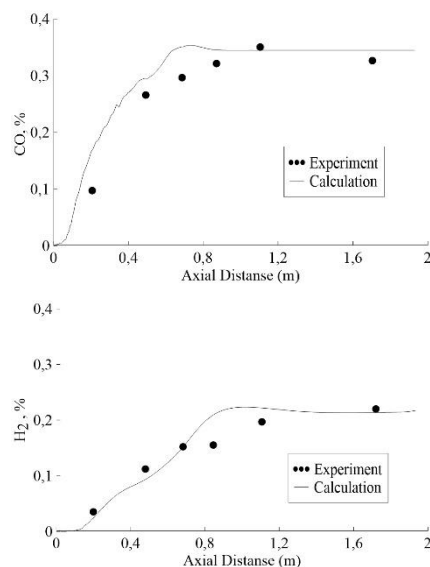


Рис. 2. Объемная концентрация горючих газов (коэффициент избытка воздуха 0,43, объемная доля кислорода 0,644, отношение влаги к углю 0,14)

Получены результаты систематических расчётных исследований влияния концентрации кислорода, коэффициента избытка воздуха, расхода пара на состав генераторного газа и характеристики работы газификатора.

### Список литературы:

1. Miller BG. Carbon Dioxide Emissions Reduction and Storage. Clean Coal Eng. Technol., Elsevier; 2017, p. 609–68.
2. Kumar D, Kumar D. Coal Usage and Control of CO<sub>2</sub> Emissions. Sustain. Manag. Coal Prep., Elsevier; 2018, p. 15–33.
3. Brown, B. W., Smoot, L. D., Smith, P. J., & Hedman, P. O. Measurement and prediction of entrained-flow gasification processes. 1988, AIChE Journal, 34(3), p. 435–446.

Работа выполнена лабораторией низкоуглеродной металлургии и энергетики в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» организации-участника НОЦ «Енисейская Сибирь» в рамках национального проекта «Наука и университеты», номер проекта FSRZ-2021-0010.

УДК 532.526.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ПОМОЩЬЮ ВИДЕОСЪЁМКИ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

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

Для верификации развиваемых в настоящее время инженерных методов предсказания ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое необходима обширная база экспериментальных данных о положении начала перехода и его протяжённости, в зависимости от параметров (угла атаки обтекаемого тела, шероховатости поверхности, степени возмущённости набегающего потока). Получение таких данных с помощью термоанемометрии, LDV или PIV требует непомерно больших затрат времени. Альтернативой традиционным методам измерений может быть анализ теплообмена сразу на всей поверхности модели с помощью тепловизора (ИК термография).

В основе ИК термографии лежит подобие диффузии тепла и импульса: локальные скорости теплообмена между потоком и слегка подогретым обтекаемым телом пропорциональны коэффициенту поверхностного трения. Начало перехода к турбулентности естественно определить как точку, в которой убывание трения на стенке (в направлении среднего течения) сменяется ростом. Место, где рост прекращается, принимается за окончание перехода.

В первых попытках определить положение перехода с помощью ИК термографии анализировались распределения температуры на поверхности модели. Такие распределения, обычно, не имеют прямой связи с коэффициентом трения на поверхности, поэтому их количественный анализ затруднён. В работах [1] и [2] было предложено анализировать не саму температуру, а её временную эволюцию, что значительно упрощает, удешевляет и ускоряет экспериментальную процедуру и обработку данных. В представляемой здесь работе идея [1] доведена до состояния готовой методики, позволяющей планировать эксперимент и находить границы между ламинарной, переходной и турбулентной зонами.

Разработка метода проводилась на основе серии испытаний, проведённых в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН на модели крыла с углом стреловидности  $45^\circ$ . Скорость набегающего потока, степень его турбулентности и угол атаки варьировались в широких пределах. Перед каждым пуском трубы модель подогревалась (величина подогрева была мала и никак не влияла на устойчивость пограничного слоя и переход). Температура поверхности модели после запуска трубы регистрировалась тепловизором. На этапе обработки для каждой точки на поверхности модели анализировался ход температуры и находилась постоянная времени, которая пропорциональна трению на стенке. После подводящей нормировки и статистического анализа, каждый пиксел ИК-фильма (каждая точка на поверхности модели) получала атрибут: «ламинарная», «переходная» или «турбулентная».

Пример обработки ИК термограммы показан на рис. 1. Скорости остывания показаны цветом: малые величины ближе к чёрному, большие – светлые. Линии на рисунке показывают начало перехода и его завершение. Соответствие найденных границ реальному положению дел было установлено с помощью комплементарных термоанемометрических измерений.

Были исследованы различные режимы перехода, в которых доминирующими возмущениями были волны Толлмина-Шлихтинга, волны поперечного течения и стационарные вихри поперечного течения. Во всех трёх случаях границы переходной области были успешно найдены.

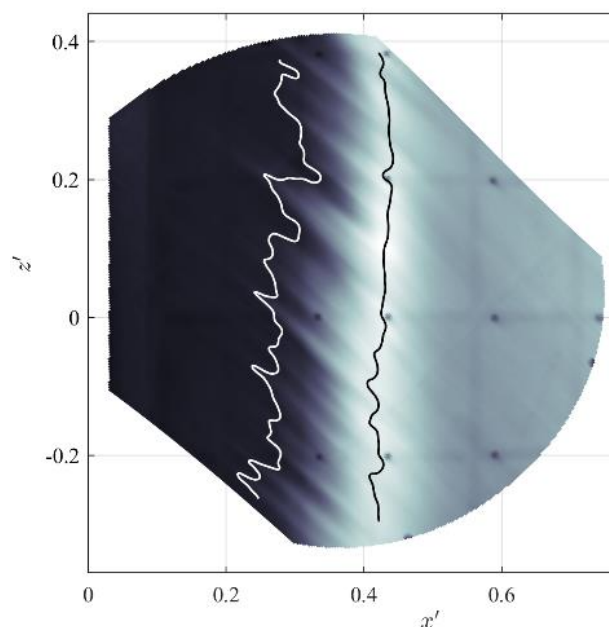


Рис. 1. Нормированная скорость остывания поверхности модели, показанная оттенками цвета, в зависимости от координат  $x'$  (хорда) и  $y'$  (размах). Светлая линия — начало перехода.

Тёмная линия — окончательная турбулизация.

### Список литературы:

1. V.I. Borodulin et al. Laminar-turbulent transition delay on a swept wing // *AIP Conf. Proc.* 1770, 030065 (2016); doi: 10.1063/1.4964007.
2. S. von Hoesslin et al. Temperature decline thermography for laminar-turbulent transition detection in aerodynamics // *Exp. Fluids* 58 (9) (2017); doi: 10.1007/s00348-017-2411-1.

Работа поддержана грантом РФФ  
№ 18–19–00460.

УДК 536.242

**МОДЕЛЬ ТЕРМОАКУСТИКИ ДЛЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГРАФЕНОВОГО ПОКРЫТИЯ****Бойко Е.В.<sup>1,2</sup>, Пильник А.А.<sup>1</sup>, Смовж Д.В.<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет

Развитие nanoиндустрии и появление различных методов создания тонкопленочных материалов привнесло значительные подвижки в областях исследования и создания термоакустических устройств.

Их отличительной особенностью, по сравнению с традиционными звуковыми эмиттерами, является отсутствие механически подвижных частей, что позволяет получать звуковое излучение с частотой вплоть до 1 МГц [1] с очень ровной амплитудно-частотной характеристикой.

Идеальным выбором, при изготовлении термоакустических преобразователей, является CVD графен. Данная аллотропная модификация углерода, обладающая стабильной двумерной структурой, имеет высокую теплопроводность 5300 Вт/м\*К и по этому критерию превосходит большинство материалов. Кроме того, толщина однослойной графеновой пленки составляет 0.3 нм, что обеспечивает наименьшую теплоемкость в сравнении с другими материалами. Такое сочетание свойств в одном материале делает графен превосходным кандидатом при создании термоакустических устройств [2–4].

Важным вопросом является влияние параметров покрытия графена на процесс теплообмена. Критически важным параметром при акустических колебаниях является однородность температуры поверхности. Это накладывает ограничения на характеристики графеновой пленки. В случае использования монокристалла графена, проводящая пленка будет иметь низкое электрическое сопротивление, что не позволит эффективно конвертировать энергию электрического сигнала в звуковые колебания. В связи с этим, целесообразным является использование поликристаллического графенового покрытия, в котором электрическое сопротивление формируется из контактного сопротивления на границах кристаллитов графена. Данные границы являются основным местом выделения всего тепла в процессе пропускания электрического сигнала через проводящую поверхность.

Существующие теоретические модели термоакустики не учитывают наличия неоднородного распределения температурного поля в поликристаллическом

покрытии графена. В работе [5] было показано, что температурный профиль в пределах одного кристаллита графена имеет вид гиперболического косинуса.

В связи с этим, цель настоящей работы заключается в представлении теоретической модели термоакустического излучения в графеновом покрытии с учётом неоднородного распределения температуры на её поверхности.

В рамках работы была исследована амплитудно-частотная характеристика термоакустических преобразователей на основе полимер-графеновых композитов. Также было исследовано влияние термических параметров подложки на эффективность термоакустического преобразования. Показано, что для достижения максимального КПД необходимо использовать подложку с минимально возможной теплопроводностью и теплоёмкостью. Было рассчитано распределение звукового давления у поверхности графена в зависимости от размера кристаллитов. В рамках использованной модели было показано, что на расстояниях свыше 200 мкм от поверхности образца размер кристаллитов графена не оказывает заметного влияния на интенсивность звукового излучения. В связи с этим при изготовлении термоакустического преобразователя рекомендуется исходить из требований, предъявляемых к вольтамперным характеристикам образца.

**Список литературы:**

1. M. Daschewski, R. Boehm, J. Prager, M. Kreutzbruck, and A. Harer, "Physics of thermo-acoustic sound generation," J. Appl. Phys., vol. 114, no. 11, p. 114903, Sep. 2013.
2. A. Ghasemi Yeklangi, S. E. Khadem, and S. Darbari, "Fabrication and investigation of a thermoacoustic loudspeaker based on carbon nanotube coated laser-scribed graphene," J. Appl. Phys., vol. 124, no. 22, p. 224501, Dec. 2018.
3. H. Tian, Y. Yang, C. Li, W. T. Mi, M. A. Mohammad, and T. L. Ren, "A flexible, transparent and ultrathin single-layer graphene earphone," RSC Adv., vol. 5, no. 22, pp. 17366–17371, Feb. 2015.
4. H. Tian et al., "Graphene-on-paper sound source devices," ACS Nano, vol. 5, no. 6, pp. 4878–4885, Jun. 2011.
5. D. V. Smovzh et al., "Joule heater based on single-layer graphene," Nanotechnology, vol. 31, no. 33, pp. 335704–335711, Aug. 2020.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-79-00250).*

УДК 621.9

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ ПОРИСТЫХ ВСТАВОК

Бондарева Н.С., Шерemet М.А.

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

Современные электронные технологии шагают в сторону увеличения плотностей тепловых потоков. Мощности процессоров последних поколений измеряются в сотнях Ватт. При таком интенсивном развитии появляется спрос на более сложные системы теплоотведения. Одним из решений является использование пассивных систем на основе материалов с изменяемым фазовым состоянием. К таким материалам относятся парафины, воски, жирные кислоты с температурами плавления до 90°C, имеющие высокую скрытую энергию плавления. Эти органические материалы имеют низкую теплопроводность, поэтому, как правило, используются в сочетании с тепловыми интерфейсами, такими как металлические ребра, пористые вставки или высокотеплопроводные наночастицы [1–3].

Добавление пористых вставок значительно повышает эффективную теплопроводность, при этом существенно снижает интенсивность циркуляции в расплаве [2–5]. В зависимости от структурных свойств пористой вставки естественная конвекция в жидкости может возникать слабая либо полностью подавляться.

В настоящем исследовании рассматривается нестационарная задача плавления лауриновой кислоты в замкнутой двумерной области при наличии пористой высокотеплопроводной вставки (см. рис. 1). В качестве пористой вставки рассматривалась медная пена. Полость нагревается от источника постоянного объемного тепловыделения, расположенного у нижней стенки, верхняя и боковые границы охлаждаются воздушной конвекцией. В начальный момент времени температура рассматриваемой области была ниже температуры плавления и совпадала с температурой окружающей среды.



Рис. 1. Область решаемой задачи.

В качестве численной модели используется модель ламинарной естественной конвекции, в которой силы плавучести описываются приближением Буссинеска. Процессы теплопереноса в области были описаны с помощью локально-равновесной модели Дарси – Бринкмана [5]. Дифференциальные уравнения естественной конвекции, включающие уравнения энергии для твердой и жидкой фаз были сформулированы в безразмерных преобразованных переменных: функция тока, завихренность и температура.

Численное решение дифференциальных уравнений в частных производных было получено на основе

метода конечных разностей. Для дискретизации конвективных слагаемых в уравнении завихренности и уравнении энергии использовалась монотонная схема А.А. Самарского, диффузионные слагаемые во всех уравнениях аппроксимировались на основе центральных разностей со вторым порядком точности. Разностное уравнение Пуассона для функции тока было решено методом последовательной верхней релаксации. Для аппроксимации уравнений дисперсии завихренности и энергии была применена локально-одномерная схема А.А Самарского.

Для определения эффективной теплопроводности пористой среды с материалом с изменяемым фазовым состоянием использовалась эмпирическая модель [6].

На основе данного алгоритма было проведено численное моделирование фазовых переходов с учетом естественной конвекции в лауриновой кислоте с медной пористой вставкой в широком диапазоне определяющих параметров. Было проанализировано влияние пористости металлической пены и характерных размеров области на режим плавления материала и гидродинамику в расплаве при интенсивных и слабых режимах естественной конвекции.

### Список литературы:

1. Sharifi N. Enhancement of PCM melting in enclosures with horizontally-finned internal surfaces / N. Sharifi, T.L. Bergman, A. Faghri // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 54. P. 4182-4192.
2. Hu X. Experimental and numerical study on the thermal behavior of phase change material infiltrated in low porosity metal foam / X. Hu, F. Zhu, X. Gong // Journal of Energy Storage. 2019. Vol 26. 101005.
3. Qu Z.G. Passive thermal management using metal foam saturated with phase change material in a heat sink / Z.G. Qu, W.Q. Li, J.L. Wang, W.Q. Tao // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 39(10). Pp. 1546–1549.
4. Diani A. Melting of PCMs embedded in copper foams: An experimental study / A. Diani, L. Rossetto // Materials. 2021. Vol. 14(5). 1195.
5. Астанина М.С. Моделирование смешанной конвекции жидкости с переменной вязкостью в частично пористом горизонтальном канале с источником тепловыделения / М.С. Астанина, М.А. Шерemet // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. т. 11. № 1. с. 95-107/
6. Boomsma K. On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam / K. Boomsma, D. Poulikakos // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2001. Vol. 44(4). Pp. 827–836.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

УДК 532.542

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА ОТВЕРЖДАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ В СЛУЧАЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ПЛОСКОГО КАНАЛА

Борзенко Е.И., Шрагер Г.Р.

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

Производства изделий из полимерных материалов характеризуются сложными гидродинамическими, теплофизическими и химическими процессами. В технологии их переработки методом литья часто реализуется заполнение плоских и осесимметричных емкостей. Полимерные материалы, способные к отверждению в процессе их нагрева, относятся к реактопластам. Отверждение – химический процесс, в результате которого происходит необратимое превращение жидких реакционноспособных олигомеров или полимеров в твердые неплавкие и нерастворимые сетчатые полимеры. Реактопласты нашли широкое применение в авиа- и судостроении, в ракетостроении, в производстве строительных материалов, при этом организация технологического процесса их переработки требует значительных усилий вследствие большого числа факторов, влияющих на него.

Рассматривается заполнение плоского зазора неньютоновской жидкостью в неизотермических условиях с учетом вязкой диссипации и реакции отверждения, протекающей за счет тепла подводимого через стенки зазора. Математическая постановка включает уравнения движения, неразрывности и энергии. Реология среды описывается модифицированной моделью Cross-WLF [1], которая учитывает влияние температуры, интенсивности скоростей деформации и глубины химического превращения на величину эффективной вязкости. Кинетика реакции отверждения определяется в соответствии с уравнением, в основе которого заложена реакция  $n$ -ого порядка с самоускорением. Адекватность используемого кинетического уравнения и реологического закона для смолы марки Vupcolit X655 подтверждается согласованием с калориметрическими и вискозиметрическими экспериментальными данными других авторов. Во входном сечении жидкость подается с заданным расходом и нулевой степенью отверждения. Профили скорости и температуры соответствуют установившемуся одномерному течению жидкости с данной реологией. На твердой стенке используется условие прилипания и задана постоянная температура. На свободной поверхности задаются условие отсутствия касательного напряжения, а нормальное равно внешнему давлению, которое без ограничения общности равно нулю, тепловой поток равен нулю. Капиллярные эффекты не учитываются. Движение границы описывается с помощью кинематического условия. В начальный момент времени канал частично заполнен жидкостью.

Поставленная задача решается численно с использованием оригинальной методики, в основе которой лежит метод контрольного объема и процедура SIMPLE для удовлетворения уравнения неразрывности. Свободная поверхность аппроксимируется набором маркеров, равномерно расположенных вдоль нее

в начальный момент времени. Динамические граничные условия на свободной поверхности удовлетворяются с помощью метода инвариантов, описанного в работе [2]. Движение маркеров осуществляется с помощью разностных аналогов кинематического граничного условия. При достижении точки гелеобразования материал теряет текучие свойства, а значение эффективной вязкости стремится к бесконечности. В этой связи выполняется регуляризация реологического закона, подобная регуляризации вязкопластичных жидкостей.

Проанализировано распределение кинематических, динамических и теплофизических характеристик потока в зависимости от заданной температуры стенки и среднерасходной скорости во входном сечении. В случае, когда температура стенки не достаточна для реализации реакции отверждения, в окрестности свободной поверхности реализуется двумерное фонтанирующее течение, а остальной части канала – одномерное установившееся течение. С ростом температуры стенки начинают проявляться эффекты отверждения. Выявлено наличие трех характерных зон в потоке в процессе заполнения: неподвижный слой на твердой стенке с высокой степенью отверждения; центральное ядро с практически однородным распределением характеристик; переходной участок между центральным ядром и неподвижным слоем, выполняющий роль «смазочного» слоя. Последний характеризуется низкой вязкостью, небольшими степенями отверждения и высокой температурой.

Анализ критериев подобия для рассмотренных условий течения показал, что поток имеет ползущий характер ( $Re < 0.01$ ), а на распределение температуры основное влияние оказывает конвективный перенос тепла ( $Pe > 100$ ); влияние диссипативного разогрева и экзотермического эффекта реакции отверждения не существенны. Структура потока определяется прогревом жидкости через стенку, так как он влияет на реологические характеристики среды и скорость образования затвердевшего слоя.

### Список литературы:

1. Malkin A.Y., Kulichikhin S.G. Rheokinetics of curing // Polymer Compositions Stabilizers/Curing. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. 1991. P. 217–257.
2. Васенин И.М., Сидонский О.Б., Шрагер Г.Р. Численное решение задачи о движении вязкой жидкости со свободной поверхностью // Доклады АН СССР. 1974. Т. 217. № 2. С. 295–298.

*Исследование выполнено за счет гранта РФФ  
(проект № 18-19-00021-П).*

УДК 534.222.2+536.46+661.215.1

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТОНАЦИИ ЗА ОСЛАБЕВАЮЩИМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Борискин А.А.<sup>1,2</sup>, Васильев А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Для надежного возбуждения в горючей смеси волны низкоскоростного горения внешний инициатор должен «передать» смеси такое количество своей энергии, которого должно хватить не только на воспламенение смеси вблизи точки инициирования, но и обеспечить дальнейшее распространение фронта пламени на весь объем смеси за счет энергии химического превращения исходных веществ в продукты горения. Традиционно эта энергия называется критической энергией воспламенения и для большинства типичных углеводородных топлив она составляет величины на уровне миллиджоулей. Аналогично критической энергией инициирования детонации считается энергия внешнего инициатора, обеспечивающая сверхзвуковое распространение детонационной волны на весь объем смеси. Критическая энергия инициирования детонации на несколько порядков превышает критическую энергию воспламенения смеси. Эти критические энергии обеспечивают режимы самоподдерживающегося распространения волн горения или детонации с присущими этим процессам постоянными величинами скоростей. Значительный интерес представляет промежуточный случай, когда при относительно слабом инициаторе вначале смесь только воспламеняется, а затем за счет естественного или искусственного ускорения процесс разгоняется до околосвуковых значений, переводится на сверхзвук и затем может перейти на детонационный режим (переход горения в детонацию – ПГД). Проблема ПГД – одна из важнейших в современной науке о горении и детонации. Экспериментально ПГД наблюдался и исследовался в прямолинейных трубах. В расширяющихся волнах вопрос о возможности ПГД является дискуссионным до сих пор.

Целью данной работы является исследование возможности инициирования детонационного процесса именно в расходящихся волнах, скорость которых уменьшается по мере распространения. Искусственным инициатором при этом выступает препятствие, при натекании расходящейся волны на которое возникает за счет отражения область повышенного давления и температуры. Такая область представляет собой «горячую точку», способную резко ускорить скорость химической реакции и выступить как «дополнительный инициатор». Меняя положение препятствия, можно определить критические параметры, при которых наблюдается ПГД (см. рис. 1–3). Представлены и обсуждены экспериментальные результаты.

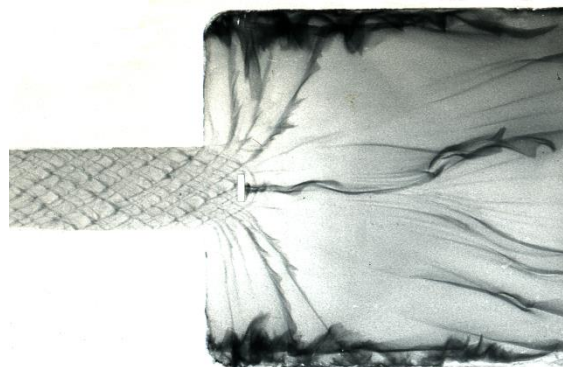


Рис.1 Пример затухающей детонационной волны.

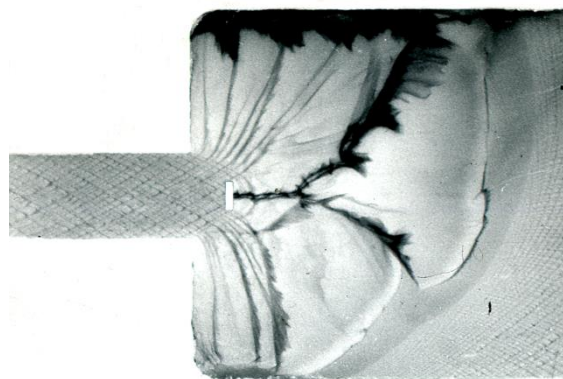


Рис.2 Пример переходного процесса (реиницирование детонации от боковой стенки).

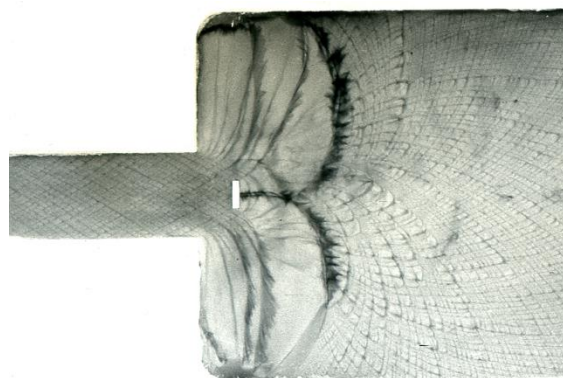


Рис.3 Пример восстановления детонационной волны за обтекаемым препятствием.

УДК 536.2

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ВВОДА И ВЫВОДА СИСТЕМЫ ВОЗДУХООБМЕНА НА ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ В ПОМЕЩЕНИИ С ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ

Борисов Б.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
e-mail: elf@tpu.ru

Проведено математическое моделирование процессов теплопереноса в производственном помещении с работающим газовым инфракрасным излучателем (ГИИ) и системой воздухообмена (рис. 1).

Постановка задачи для несжимаемого прозрачного для теплового излучения воздуха, изменяющего свою плотность только при изменении температуры согласно с гипотезой Буссинеска, соответствует той, которая представлена авторами в работе [1]. Анализировалось влияние работы системы воздухообмена (геометрическое расположение зон ввода и вывода воздуха) на тепловой режим помещения. Температура поступающего воздуха соответствует начальной в помещении  $7^{\circ}\text{C}$ , расход  $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$  (однократное обновление воздуха в помещении за час). Приток или отток воздуха (область «активного» входа или выхода) задавался массовым расходом (3, рис.1), «пассивного» - внешним давлением (4, рис.1).

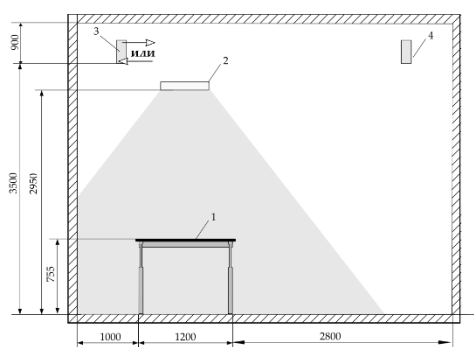


Рис. 1. Область исследования: 1 – горизонтальная панель, 2 – ГИИ, 3, 4 – области «активного» и «пассивного» притока и оттока воздуха, соответственно.

Наличие системы воздухообмена и заданное геометрическое расположение областей входа и выхода воздуха обусловлены, во-первых, необходимостью отвода продуктов сгорания от ГИИ светлого типа, а во-вторых областью их размещения – верхняя часть помещения (выше уровня ГИИ). В этом случае, наиболее целесообразным для анализа, выбрано варьирование месторасположения области ввода воздуха в помещение.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты численного моделирования конвективно-кондуктивного теплопереноса в рассматриваемом помещении с работающим ГИИ и системой воздухообмена для момента времени  $\tau$ , соответствующего 1 часу физического времени. Как показывает анализ результатов моделирования, в случае расположения зон притока и оттока воздуха в верхней части области исследования (рис. 2), температурный режим помещения обусловлен в большей мере смешанной конвекцией. В этом случае поток воздуха выходя из области вдува, способствует перемещению

нагретого воздуха по часовой стрелке вокруг ГИИ с выравниванием температурного поля в помещении.

Для случая оттока воздуха из помещения меняется структура течения в области исследования. Холодный воздух, поступающий из области «пассивного» притока, увлекает в своем движении соседние нагретые слои вниз (рис. 3, а), что способствует формированию температурного поля близкого тому, что представлено на рис. 2.

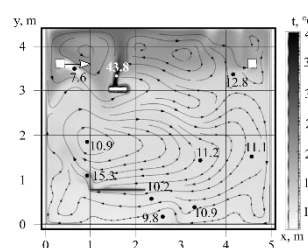


Рис. 2. Поле температур и линии тока к 60 – ой минуте работы ГИИ. Область вдува воздуха располагается в левой части помещения, а оттока в правой.

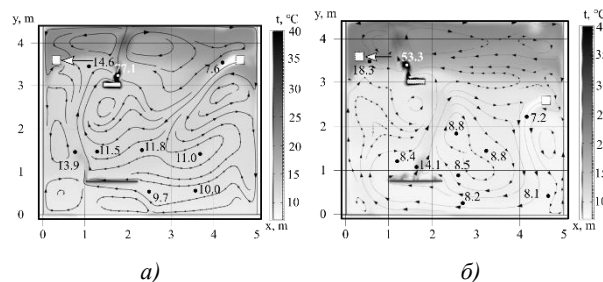


Рис. 3. Поля температур и скоростей к 60 – ой минуте обогрева. Область выхода воздуха располагается в левой части помещения, а входа в правой на высоте 3,5 м (а) и 2,5 м (б).

При перемещении области «пассивного» притока на уровень ниже ГИИ (рис.3, б) втекающий холодный воздух поступает непосредственно в центральную и нижнюю часть помещения при этом снижая температуры в этих областях на 2-3 градуса.

На основании анализа полученных результатов можно сделать вывод, о том что изменяя месторасположение областей ввода и вывода воздуха системы воздухообмена при работе ГИИ можно изменять температурный и скоростной режим воздуха в локальных рабочих зонах.

### Список литературы:

1. Borisov B.V., Kuznetsov G.V., Maksimov V.I., Nagornova T.A., Vyatkin A.V. Numerical analysis of the equipment position influence on the premises thermal regime under gas infrared emitter operation and mixed convection conditions // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2119, Paper 012092

Работа поддержана РФФ (грант № 20-19-00226).

УДК 532.526.3

## ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ СКОльзяЩЕГО КРЫЛА К ЛОКАЛИЗОВАННЫМ НЕОДНОРОДНОСТЯМ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ МОД ПОПЕРЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ

Бородулин В.И., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1  
misch2005@yandex.ru

В докладе представлены результаты обширных количественных экспериментальных исследований эффективного механизма порождения мод неустойчивости поперечного течения (ПТ) в пограничном слое на модели скользящего крыла локализованными (по продольной координате) неоднородностями поверхности: вибрациями и неровностями. Работа выполнена в рамках международного проекта RECEPT Седьмой Европейской рамочной программы. Исследование соответствующей задачи восприимчивости имеет большое значение для решения проблемы управления ламинарно-турбулентным переходом в трехмерных пограничных слоях.

Эксперименты проведены при скорости набегающего потока 10 м/с в пограничном слое экспериментальной модели с ламинаризованным крыловым профилем (угол скольжения 35°, хорда 0,8 м), установленной в рабочей части малотурбулентной аэродинамической трубы МТЛ (КТИ, Стокгольм) под углом атаки –5 град. Для обеспечения выполнения условия скольжения модель была снабжена профилированными боковыми ложными стенками. В условиях эксперимента нарастание мод неустойчивости Толлмина-Шлихтинга было подавлено благоприятным градиентом давления, а моды неустойчивости ПТ, напротив, могли усиливаться вниз по потоку. Основные измерения выполнены одним датчиком термоанемометра.

Неоднородности поверхности моделировались специальными источниками возмущений – вибрирующими на частоте  $f_s$  мембранами диаметром 6 мм, смонтированными заподлицо с поверхностью на расстоянии ~130 мм от передней кромки модели. Использовались либо единичные мембраны, либо периодические по размаху с шагом 8 мм. В квазистационарном режиме частота колебаний мембраны была равна 2 Гц.

В результате работы источников, в пограничном слое зафиксировано эффективное порождение на частоте вибраций  $f_s$  локализованных, либо периодических, по размаху пакетов волн неустойчивости ПТ.

Обнаружено, что их развитие вниз по потоку прекрасно согласуется с расчетами, выполненными по линейной теории устойчивости [1], что позволило провести экстраполяцию кривых нарастания амплитуд и фаз ПТ-вихрей на положение источников возмущений с целью определения «начальных» значений этих величин. Эти величины были необходимы для нахождения количественных характеристик исследуемой задачи: амплитуд ( $G_s$ ) и фаз ( $\lambda_s$ ) коэффициентов вибрационной восприимчивости (рис. 1). Эти коэффициенты представляют собой отношение комплексных спектральных амплитуд ПТ-вихрей в положении источника к резонансному им спектру неоднородностей поверхности. Будучи определёнными в Фурье-пространстве частот и поперечных волновых чисел, эти коэффициенты, не зависят от конкретной формы неоднородностей поверхности. В докладе результаты настоящего исследования качественно сопоставляются с доступными предыдущими экспериментальными данными, полученными ранее на плоской модели скользящего крыла с углом скольжения 25 градусов с использованием более грубой процедуры нахождения амплитуд и фаз начальных возмущений, а также с расчётами по линейной теории восприимчивости [2].

### Список литературы:

1. V.I. Borodulin et al Experimental and theoretical study of swept-wing boundarylayer instabilities. Unsteady crossflow instability // Physics of Fluids 31, 064101 (2019) doi: 10.1063/1.5094609
2. V.R. Gaponenko et al. Swept-wing boundary-layer receptivity to surface non-uniformities, J. Fluid Mech. 461 (2002) 93–126.

Работа поддержана программой ЕС FP7 (грант ACPO-GA-2010-265094) и госзаданием Министерства науки и высшего образования РФ (проекты № 121030500149-8 и АААА-А19-119051590050-2).

Авторы признательны R. Örlü, A. Hanifi и S. Hein за большую помощь в выполнении этого исследования.

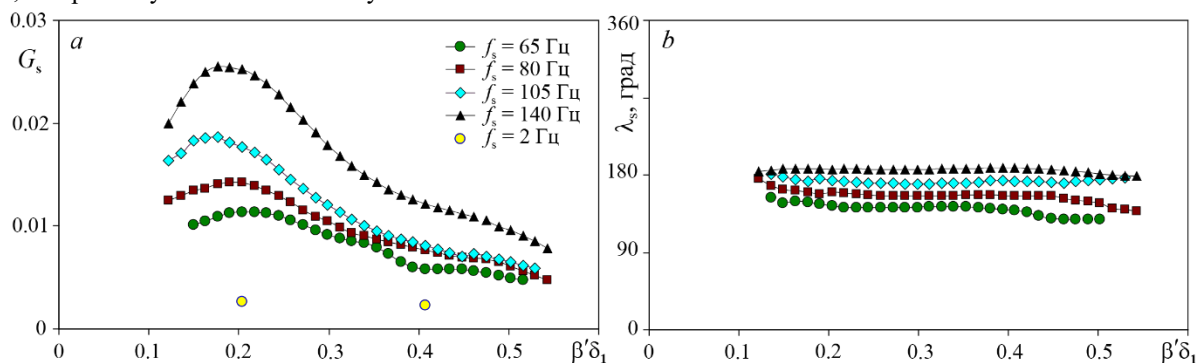


Рис. 1. Амплитуды (а) и фазы (б) коэффициентов вибрационной восприимчивости в зависимости от частоты  $f_s$  и поперечного волнового числа  $\beta'$  (обезразмеренного на толщину вытеснения  $\delta_1$  в положении источника).



УДК 532.526.3

## ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО КРЫЛА К ВИХРЕВЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ НА НЕОДНОРОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ МОД ПОПЕРЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ

Бородулин В.И., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.

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

Доклад посвящён результатам экспериментального исследования механизма возбуждения мод неустойчивости поперечного течения (ПТ) в пограничном слое скользящего крыла при рассеянии вихревых возмущений набегающего потока на нестационарных (в общем случае) неоднородностях поверхности, локализованных по продольной координате. Решение этой задачи имеет принципиальное значение при создании методов управления процессом возникновения турбулентности. Ярким примером такого управления служит явление вихревой автодеструкции, обусловленное механизмом восприимчивости пограничного слоя, способное приводить к существенной задержке ламинарно-турбулентного перехода. Эксперименты проведены в рамках международного проекта «РЕСЕРТ» 7-й Европейской рамочной программы. В докладе представлены результаты второго этапа исследований, на первом этапе которого были получены уникальные результаты по устойчивости данного пограничного слоя к модам ПТ [1].

Измерения проводились при скорости набегающего потока около 10 м/с в пограничном слое ламинаризованного крылового профиля с углом скольжения 35°, установленного в рабочей части малотурбулентной аэродинамической трубы МТЛ (Королевский технологический институт, Стокгольм) под углом атаки -5°. Для обеспечения выполнения условия скольжения модель была снабжена профилированными боковыми ложными стенками, рассчитанными по форме линий тока невязкого течения на границе пограничного слоя крыла. В условиях данного эксперимента нарастание волн Толлмина-Шлихтинга было подавлено благоприятным градиентом давления, и в пограничном слое доминировали моды неустойчивости ПТ. Основные измерения были выполнены датчиками термоанемометра.

Эксперименты проводились в условиях контролируемых возмущений, как набегающего потока, так и обтекаемой поверхности. Вихревые возмущения набегающего потока создавались тонкой вибрирующей

проволочкой, были однородными по размаху (т.е. по координате  $z'$ ) и имели преимущественно  $z'$ -компоненту вектора завихренности. Нестационарные возмущения обтекаемой поверхности создавались одним или несколькими (периодическими по размаху) круглыми вибраторами, расположенными на расстоянии ~130 мм от передней кромки модели.

Вибрирующая проволока создавала в потоке гармоническую антисимметричную вихревую дорожку (типа дорожки Кармана) частотой  $f_v$  малой амплитуды (в десятые доли процента от скорости потока), которая бежала вниз по потоку в районе границы пограничного слоя. Эти возмущения взаимодействовали с течением в окрестности вибратора поверхности, осциллирующего с частотой  $f_s$ , что приводило к порождению мод неустойчивости ПТ на комбинационных частотах ( $f_{\pm} = f_s \pm f_v$ ) и поперечных волновых числах. При этом возбуждаемые моды ПТ имели тот же спектр волновых чисел  $\pm\beta'$ , что и у вибраций поверхности, поскольку волновое число вихревых возмущений потока равнялось нулю.

Детальный анализ полученных данных позволил получить количественные значения коэффициентов восприимчивости вихрь-неровность (см., например, рис. 1), которые сопоставлены в докладе с ранее известными данными. Приведены оценки сравнительной эффективности механизмов вибрационной восприимчивости и восприимчивости вихрь-неровность.

### Список литературы:

1. V.I. Borodulin et al. Experimental and theoretical study of sweeping boundary-layer instabilities. Unsteady crossflow instability // Physics of Fluids 31, 064101 (2019) doi: 10.1063/1.5094609.

*Работа поддержана программой ЕС FP7 (грант ACPO-GA-2010-265094) и госзаданием Минобрнауки РФ (проекты № 121030500149-8 и АААА-А19-119051590050-2).  
Авторы благодарны Р. Ёрлю, А. Ханифи и С. Хайну за большую помощь в выполнении этого исследования.*

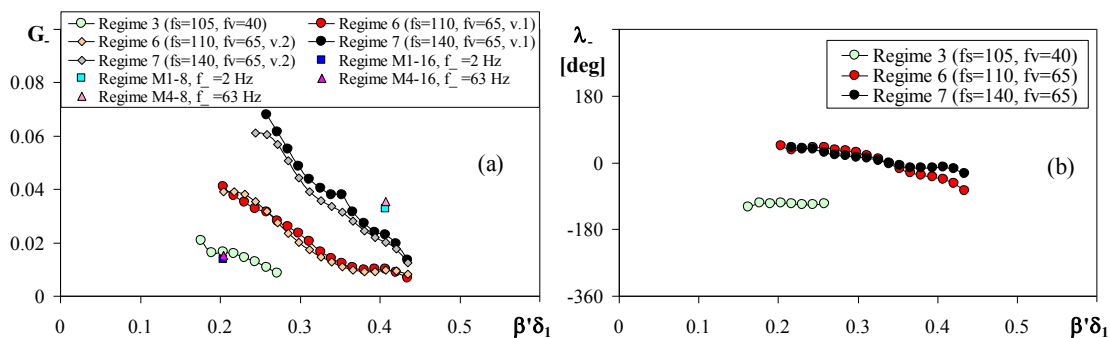


Рис. 1. Амплитуды (а) и фазы (б) коэффициентов восприимчивости вихрь-неровность, полученные в ряде режимов для разностных комбинационных мод различных частот в зависимости от поперечного волнового числа  $\beta'$ .

УДК 536.423

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОЙ СТРУИ ВСКИПАЮЩЕЙ ВОДЫ

Бусов К.А., Мажейко Н.А.

Институт теплофизики УрО РАН,  
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Исследование струй вскипающих жидкостей [1, 2] представляет значительный интерес как для фундаментального знания (развитие и получение новых представлений в области физики кипения), так и для практических приложений (совершенствование и создание различных устройств мелкодисперсного распыла) [3, 4].

Цель данной работы заключалась в исследовании динамики вскипания свободной струи перегретой воды. В ходе экспериментального изучения прослежено изменение формы, угла раскрытия, изменение длины не вскипевшего участка и дисперсионный капельный состав струи для различных степеней перегрева жидкости.

Истечение вскипающей струи воды происходило из сосуда высокого давления через короткий цилиндрический канал (диаметр  $d=0.3$  мм) с острыми входными и выходными кромками в атмосферу. Начальные условия (температура, давление) в рабочей камере соответствовали линии фазового равновесия и изменялись в широком диапазоне:  $T_s=380-580$  К,  $p=0.1-10$  МПа.

Исследования показали, что все изучаемые характеристики метастабильной струи непосредственным образом связаны с кинетикой парообразования. Так, например, с увеличением температуры в сосуде высокого давления наблюдалось поэтапное изменение формы струи – стержневой вид (рис. 1а, режим интенсивного испарения и слабого вскипания) сменялся на конический (рис. 1б, вскипание на гетерогенных центрах) с последующим переходом к форме эллиптического параболоида (рис. 1в, проявление интенсивного гомогенного зародышеобразования).

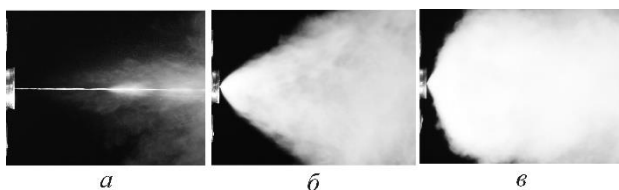


Рис. 1. Форма струи вскипающей воды при различных температурах: а –  $T_s=473$  К, б –  $T_s=513$  К, в –  $T_s=583$  К.

На рисунке 2 изображен характер изменения угла раскрытия вскипающей струи. Хорошо видно, что с увеличением интенсивности фазового перехода жидкость – пар возрастает величина угла раскрытия вблизи выходного среза канала. Причем, при переходе от одного режима вскипания к другому, изменение угла раскрытия происходит достаточно резко.

При изучении длины не вскипевшего участка струи было установлено, что с ростом температуры

происходит его сокращение (сечение вскипания смещается в сторону выходного среза канала). На основании экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость изменения длины такого участка от термодинамических параметров.

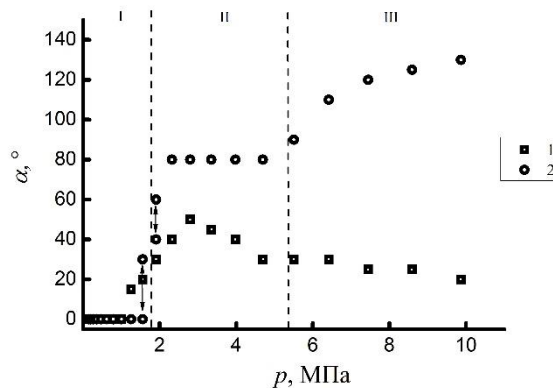


Рис. 2. Изменение угла раскрытия струи перегретой воды на различных расстояниях от выходного среза канала: 1 – 0.5 м, 2 – 0.05 м. Стрелками показаны флуктуации угла раскрытия. I – область интенсивного испарения и одиночных актов вскипания, II – область гетерогенного вскипания, III – область гомогенного зародышеобразования.

С помощью микроскопического метода был проведен анализ размеров капель, образующихся при интенсивном вскипании струи перегретой воды. Результаты опытов показали, что с увеличением степени перегрева жидкости происходит уменьшение диаметра возникающих в потоке капель. Определен средний диаметр частиц (средний диаметр Заутера) и представлены их распределения для различных режимов вскипания.

### Список литературы:

1. Скрипов, В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972, 312 с.
2. Pavlenko A.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Surtaev A.S., Tsoi A.N., Mazheiko N.A., Busov K.A., Skokov V.N. Disintegration of Flows of Superheated Liquid Films and Jets // Journal of Engineering Thermophysics. 2013. V. 22, № 3. P. 174–193.
3. Lefebvre A. H., McDonell V. G. Atomization and Sprays, CRC Press, 2017.
4. Eggers J., Villermaux E. Physics of liquid jets // Rep. Prog. Phys. 2008. V. 71. P. 1 – 79.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ № 22-29-00426.

УДК 534.2

## НЕПРЕРЫВНОЕ ДЕТОНАЦИОННОЕ СЖИГАНИЕ АВИАЦИОННОГО КЕРОСИНА В ВОЗДУХЕ В ВИХРЕВОЙ РАДИАЛЬНОЙ КАМЕРЕ

Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.

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

Сжигание керосина в воздухе в детонационных режимах имеет важный теоретический и практический интерес. В работе [1] непрерывные спиновые детонационные (НСД) режимы сжигания керосина были осуществлены в вихревом потоке воздуха плоскорадиальной камеры сгорания (КС) с внешним диаметром  $d_{c1}=500$  мм и истечением продуктов детонации к центру. Воздух подавался в КС через щель 5 или 1.8 мм на внешнем диаметре КС, а продукты детонационного горения отводились через отверстие диаметром 125 мм в одной из стенок КС.

Цель настоящей работы – реализация и изучение детонационного горения гетерогенных смесей авиационный керосин - воздух в проточной вихревой радиальной КС диаметром 500 мм с истечением продуктов сгорания к центру при варьировании геометрии отверстий подачи воздуха и формы канала для выхода продуктов.

Схема вихревой КС 1 представлена на рис. 1.

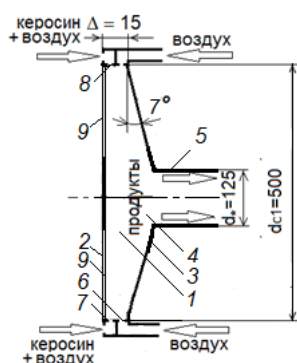


Рис.1. Схема камеры сгорания.

Одна из стенок КС 2 была плоской, а другая 3 – с наклоном к ней на  $7^\circ$  и с отверстием в центре 4. В опытах отверстие оставалось свободным, или к нему пристыковывался цилиндр 5 длиной 150 мм. Опыты проводились при подаче воздуха через 300 отверстий 6 с поперечным сечением  $2 \times 5$  мм<sup>2</sup>, расположенных на цилиндрической поверхности 7 с наклоном к образующей под  $45^\circ$ . Керосин в КС подавался через 600 отверстий 8 с поперечным сечением  $0.8 \times 0.6$  мм<sup>2</sup> и перед подачей в КС барботировался воздухом. Массовая доля воздуха в барботируемом керосине составляла –  $m_{a,r} = 5-8\%$ , что далеко от пределов детонации и безопасно для использования в системе подачи горючего. Процесс регистрировался высокоскоростной камерой с частотой 420000 кадров в секунду через два радиальных окна 9. При свободном истечении (без насадки 5) реализована НСД с одной вращающейся поперечной детонационной волной (ПДВ) со скоростью  $D$ , близкой к скорости детонации Чепмена-Жуге (рис. 2а). Расходы воздуха при НСД составляли

$G_a=3.1-11.4$  кг/с, а керосина –  $G_f=0.2-0.61$  кг/с. Коэффициент избытка горючего изменялся в пределах  $\varphi=0.81-1.07$ . При установке на выходе КС цилиндра 5 наблюдали пульсирующую детонацию (ПД) с радиальными волнами и частотой  $f \approx 0.2$  кГц (рис. 2б). Расходы воздуха при ПД составляли  $G_a=14.5-23.6$  кг/с, а керосина –  $G_f=0.4-0.84$  кг/с,  $\varphi=0.4-1.09$ .

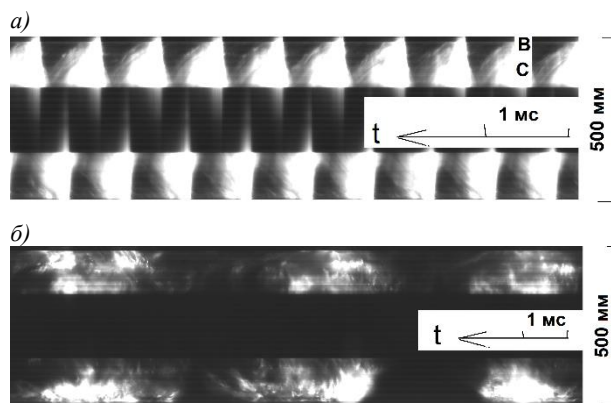


Рис. 2. Фоторегистрограммы (фрагменты): а) – НСД:  $G_a=5.04$  кг/с,  $\varphi=0.98$ ,  $D=1.92$  км/с; б) – ПД:  $G_a=15.7$  кг/с,  $\varphi=0.72$ , (частота  $f=0.2$  кГц).

Структура детонационных волн и течение в их окрестности принципиально не отличались от наблюдавшихся ранее [1]. Течение за фронтом детонационной волны ВС при НСД нестационарное с множеством более слабых нестационарных ударных волн.

Показано, что разбиение сплошной струи воздуха на отдельные струи с сохранением их площади, благоприятно отражается на режимах НСД – увеличивается скорость ПДВ и область существования по расходам компонентов смеси. Установка цилиндрической насадки подавляет НСД. Центробежные силы, действующие на поток смеси и продукты детонации, сильно влияют на систему подачи воздуха и керосина – снижают их расходы.

### Список литературы:

1. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная спиновая детонация смеси керосин-воздух в проточной вихревой радиальной камере диаметром 500 мм // Физика горения и взрыва. 2022. Т.58, №1. С. 40-52. DOI: 10.15372/FGV20220104.

Работа выполнена при финансовой поддержке  
Программы фундаментальных исследований  
№ 2.3.1.2.4.

УДК 534.2

## НЕПРЕРЫВНАЯ МНОГОФРОНТОВАЯ ДЕТОНАЦИЯ ВОДОКЕРОСИНОВОЙ ЭМУЛЬСИИ С НАГРЕТЫМ ВОЗДУХОМ

Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.

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

Сжигание керосина в воздухе в детонационных режимах имеет важный теоретический и практический интерес. Режимы непрерывной многофронтной детонации (НМД) в гетерогенных смесях авиационный керосин - холодный воздух были реализованы в проточной кольцевой цилиндрической камере сгорания диаметром 503 мм (ДК-500) [1].

Цель настоящей работы – в ДК-500 с кольцевой форкамерой реализовать и исследовать детонационное горение водотопливной эмульсии (ВТЭ) с горячим воздухом, предварительно нагретым огневым способом в форкамере от 600 до 1200 К.

В опытах варьировались: температура  $T_p$  и удельные расходы  $g_\delta$  нагретого воздуха, коэффициент избытка горючего  $\phi$ , массовое содержание воды в ВТЭ  $m_w$ . Наблюдали режимы НМД с одной или двумя парами сталкивающихся поперечных волн (рис. 1).

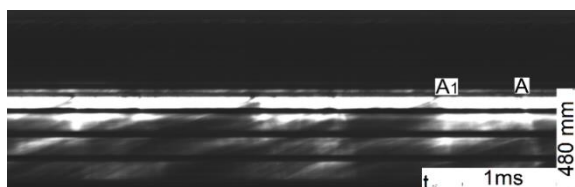


Рис. 1. Фоторегистрограмма (фрагмент) режима НМД двухфазной смеси ВТЭ – подогретый воздух в камере сгорания:  $g_\delta=946 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ ,  $T_p=600 \text{ К}$ ,  $\phi=0.78$ ,  $m_w=0.38$ ,  $n=2$ ,  $\langle D \rangle=0.78 \text{ км}/\text{с}$  (частота  $f=0.98 \text{ кГц}$ ).

Верхняя часть фоторегистрограммы отображает слабое свечение процесса горения водорода в форкамере длиной 350 мм. Нижняя часть фоторегистрограммы отображает свечение режима НМД в камере сгорания со встречными ПДВ, две из которых  $A$  и  $A'$  обозначены на рис. 1. Белые и темные диагональные линии – это траектории продуктов сгорания. Черные горизонтальные линии (ширина 24 мм) – непрозрачные участки камеры сгорания между окнами. В камере сгорания наблюдается очень нерегулярная структура поперечных волн, как и в классической многофронтной детонации [2].

Частота вращения встречных ПДВ составляла  $1.0\pm 0.1 \text{ кГц}$  для одной пары детонационных волн и  $2.4\pm 0.2 \text{ кГц}$  для двух пар детонационных волн. Повышенная частота соответствовала более нагретому воздуху. Показано, что увеличение содержания воды в ВТЭ снижает степень диссоциации продуктов детонации. При более низких температурах в указанном диапазоне вода становится ингибитором и уменьшает степень сгорания керосина в ВТЭ.

Нагрев воздуха способствует реализации детонационного сжигания ВТЭ. По измерениям полного и статического давления на выходе из камеры сгорания, согласно методике [3], определены удельные импульсы при непрерывной многофронтной детонации

в зависимости от расхода и температуры нагретого воздуха, а также от коэффициента избытка горючего.

Установлено, что при одном и том же удельном расходе воздуха на входе в камеру сгорания с повышением температуры воздуха от 600 до 1200 К удельный импульс тяги увеличивается в 1.5 раза вследствие уменьшения степени диссоциации продуктов детонационного горения ВТЭ. Существует нижний предел по температуре воздуха, ниже которого вода в керосине действует как ингибитор и уменьшает степень его выгорания. Для ВТЭ с содержанием воды 38% этот предел находится в диапазоне 600–800 К. Поведение удельного импульса  $I_{sp,f}$  при НМД от насыщения водой ВТЭ приведено на рис. 2.

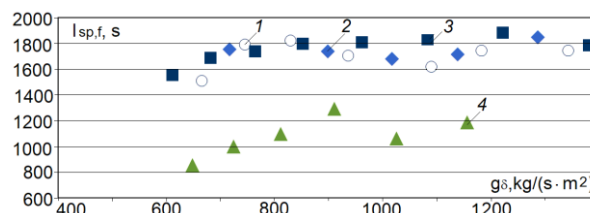


Рис. 2. Зависимости удельного импульса  $I_{sp,f}$  от удельного расхода нагретого воздуха через щель  $g_\delta$  и степени насыщения водой ВТЭ при температуре  $T_p=800 \text{ К}$ : 1, 2, 3, и 4 при  $m_w=0, 0.21, 0.38$  и  $0.53$ .

При удельном расходе воздуха на входе в камеру около  $1200 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$  максимальное значение удельного импульса с учётом энергии нагретого воздуха до температуры 1200 К составило 2200 с, а минимальное – 1600 с при температуре 600 К. При сжигании чистого керосина обратная ситуация – примерно те же значения удельных импульсов, но максимальные значения при низкой температуре 600 К. Использование ВТЭ снижает пределы существования непрерывной многофронтной детонации по сравнению с чистым керосином по коэффициенту избытка горючего – она существовала только в бедных по горючему смесях.

### Список литературы:

1. Bykovskii F.A., Zhdan S.A., Vedernikov E.F. Continuous multi-front detonation of kerosene-air mixture in an annular combustor with variations of its geometry // Shock Waves – 2021. V. 31, Iss. 8. - p. 829-839.
2. Войцеховский Б.В., Митрофанов В.В., Топчийн М.Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
3. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная детонация смеси жидкий керосин-воздух с добавкой водорода или синтез-газа // ФГВ. 2019. Т.55, №5. С. 83-92.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2020-806.

УДК 544.032.6

## ДИНАМИКА СМАЧИВАНИЯ ПРИ ПАДЕНИИ КАПЕЛЬ ВОДЫ НА ЛАЗЕРНОТЕКТУРИРОВАННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ С БИФИЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ СМАЧИВАНИЯ

Васильев М.М.<sup>1,2</sup>, Шухов Ю.Г.<sup>1</sup>, Терехов В.В.<sup>1,2</sup>, Старинский С.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Экстремальные свойства смачиваемости в современном мире играют важную роль в различных приложениях, связанных с улучшением антикоррозионных и самоочищающихся свойств [1, 2], теплообмена [3] и т.д. Особое внимание исследователей в последние годы приковано к поверхностям с бифильными свойствами смачивания, ввиду их большого потенциала для прикладных задач в промышленности [4, 5]. Например, в работе [5] авторы показали, что расходящиеся супергидрофильные дорожки на супергидрофобном основании могут перемещать набегающие струи и обеспечивать контроль охлаждения.

Свойства смачивания определяются химическим составом, а также микро- и наноструктурой, варьировать которые можно с помощью различных технологических подходов. Одним из методов позволяющим тонко контролировать оба этих аспекта является импульсная лазерная абляция (ИЛА), которая позволяет достигать как супергидрофильных, так и супергидрофобных состояний. [6]. Метод характеризуется вариативностью относительно материалов и гибкости в подборе параметров. Несмотря на все достоинства, применение лазера для создания поверхностей с контрастной смачиваемостью слабо освещено в литературе [5]. В ходе данной работы предлагается систематически исследовать взаимодействие капель воды с текстурированными лазером медными поверхностями: провести численное моделирование методом решеточных уравнений Больцмана и экспериментальную реализацию падения капель воды на поверхности с бифильными свойствами смачивания.

Абляция медных образцов происходила при помощи Nd:YAG лазера ( $\lambda=1064$  нм). Процесс создания бифильных поверхностей состояла из двух этапов и представлен на рис. 2. Сперва медная поверхность (чистота 99.9%) обрабатывалась в условиях атмосферы для достижения супергидрофильных состояний. Параметры обработки представлены в предыдущей работе авторов [7]. На втором этапе путем локального удаления супергидрофильного слоя лазером были созданы гидрофильные участки. Численное моделирование в данной работе осуществляется с помощью метода решеточных уравнений Больцмана (LBM). Метод LBM хорошо известен в литературе, как инструмент для описания различных задач физики многофазных течений [8, 9]. Полученные в ходе работы экспериментальные данные использовались для верификации численной модели. Таким образом, была получена верифицированная численная модель на основе LBM, позволяющая обобщить полученные экспериментальные результаты на широкий диапазон режимов.

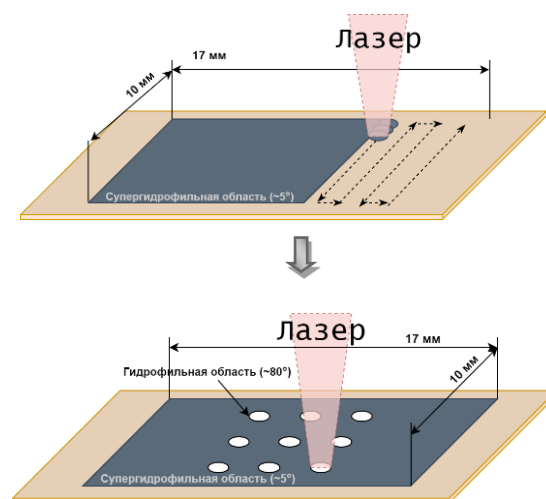


Рис. 1. Схема процесса создания бифильной медной поверхности. Сперва медь обрабатывается в условиях атмосферы. Затем в условиях вакуума лазером локально удаляются супергидрофильные участки.

### Список литературы:

1. Ganesh V. A. et al. A review on self-cleaning coatings // Journal of Materials Chemistry. 2011. Т. 21. №. 41. P. 16304-16322.
2. Zhang F. et al. Preparation of superhydrophobic films on titanium as effective corrosion barriers // Appl. Surf. Sci. Elsevier B.V., 2011. Vol. 257, № 7. P. 2587–2591.
3. 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.
4. Liang G., Mudawar I. Review of spray cooling—Part I: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Т. 115. P. 1174-1205.
5. Koukoravas T. P. et al. Spatially-selective cooling by liquid jet impinging orthogonally on a wettability-patterned surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Т. 95. – С. 142-152.
6. Starinskiy S. V. et al. Formation of periodic superhydrophilic microstructures by infrared nanosecond laser processing of single-crystal silicon // Applied Surface Science. 2020. Т. 512. С. 145753.
7. Vasilev M. M. et al. Modification of the copper wettability by nanosecond laser texturing // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2119. – №. 1. – С. 012126.
8. Tai Y. et al. Research on the contact time of a bouncing microdroplet with lattice Boltzmann method // Physics of Fluids. – 2021. – Т. 33. – №. 4. – С. 042011.
9. 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. – Т. 87. – №. 5. – С. 053301.

Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского научного фонда  
(проект №18-79-10119П).

УДК 533.6.072:536.244

## ВЛИЯНИЕ ВХОДНЫХ УСЛОВИЙ НА ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛЬНОМ КАНАЛЕ

Васнев И.Р., Федорова Н.Н., Гольдфельд М.А.

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

Изучение различных тепловых режимов течения сверхзвукового потока необходимо для определения тепловых нагрузок, оказываемых на стенки конструкции, разработки методов теплозащиты и исследования процессов горения [1]. Целью работы является разработка и тестирование численного алгоритма для моделирования тепловых потоков в условиях экспериментов в импульсной высокоэнтальпийной аэродинамической установке ИТ-302М [2].

Физическое моделирование проводилось в режиме присоединённого трубопровода без мультипликатора при числе Маха  $M=4$ . Максимальная полная температура в форкамере достигала  $T_0 = 2400$  К, максимальное полное давление  $P_0 = 130$  бар. Экспериментальная модель представляет собой прямоугольный канал с двумя симметричными уступами, оснащенный датчиками давления и тепловых потоков [3].

Математическое моделирование выполнено в Ansys Fluent в двумерной постановке на основе осреднённых по Фавру нестационарных уравнений Навье-Стокса, дополненных моделью турбулентности  $k-\omega$  SST. Численное моделирование течения проведено с учетом сопряжённого теплообмена между газовой средой и твёрдым телом, для чего в областях, соответствующих датчикам тепловых потоков, решено уравнение теплопроводности. Вне датчиков на стенке модели температура принималась постоянной  $T_{wall}=300$  К, что справедливо при длительности эксперимента порядка 100 мс. Расчёты выполнены без учёта нестационарных условий на входе в модельный канал, которые обусловлены особенностями режима работы импульсной установки. Нестационарные условия, соответствующие экспериментальным условиям в форкамере, задавались на входе в канал, который моделировал сопло и изолятор экспериментальной установки. На рисунке 1 показано сравнение экспериментального и расчётного статического давления в сечении перед уступом, нормированное на  $P_\infty=1$  бар. В качестве постоянных условий для давления и температуры использованы максимальные значения, реализующиеся в начале режима.

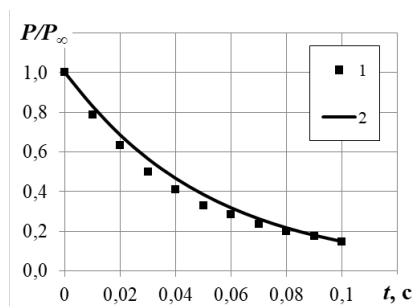


Рис. 1. Нормированное статическое давление перед уступом в эксперименте (1) и в расчете (2).

По результатам сравнения экспериментальных данных и численного моделирования было получено совпадение газодинамической структуры сверхзвукового течения (рис. 2).

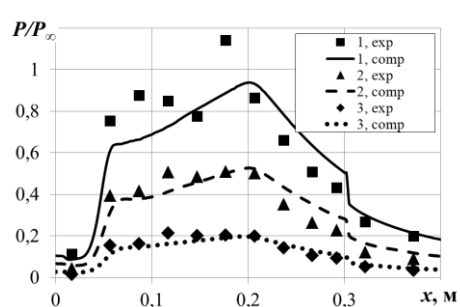


Рис. 2. Распределения нормированного давления по длине канала при  $t=20$  (1), 50 (2) и 100 мс (3).

На рис. 3 представлено сравнение экспериментальных (символы) и расчетных (линии) нормированных тепловых потоков в датчиках, расположенных на входе в канал (1) и за уступом (2, 3). Расчетные данные соответствуют «падающим» входным условиям на входе в канал,  $q_0=1,8$  МВт/м<sup>2</sup>.

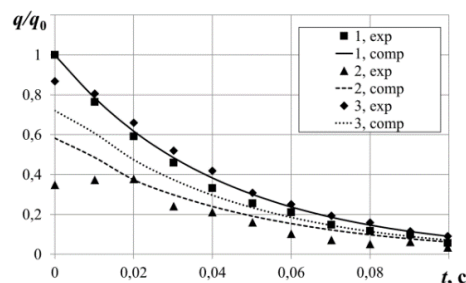


Рис. 3. Тепловые потоки в датчики, расположенные на входе в канал (1) и за уступом (2, 3).

Анализ рисунков 1–3 показывает удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных данных. В расчётах с постоянными условиями на входе получены тепловые потоки, превышающие показанные на рис. 3 значения при  $t=100$  мс в 5–7 раз.

### Список литературы:

1. Luo S., Xu D., Song J., Liu J. A review of regenerative cooling technologies for scramjets // Applied Thermal Engineering, 2021. V. 190. P. 116754.
2. Goldfeld M. A., Maslov A.A., Starov A.V., Shumskii V.V., Yaroslavtsev M.I. IT-302 M hotshot wind tunnel as a tool for the development of hypersonic technologies // AIP Conf. Proc. 2016. V 1770. P. 124415.
3. Goldfeld M. The heat flux research in hydrogen supersonic combustor at Much number of 4 // Int. Jour. Hydrogen Energy. 2021. V. 46. P. 13365-76.

Выполнено при поддержке РФФИ, грант 20-08-00959.

УДК 532.546

## РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ С МИКРОТВЭЛАМИ

Вершинина Ю.В., Прохоров С.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
111250, Россия, Москва, Красноказарменная улица, дом 14

Одним из решений, позволяющих принципиально увеличить безопасность эксплуатации ядерных реакторов, является использование тепловыделяющих сборок с микровтэлами (ТВС МТ) [1,2]. Такая сборка представляет собой коллекторную систему с микровтэлами, которые размещаются в виде свободной засыпки между перфорированными стенками коллекторов и непосредственно омываются теплоносителем. В такой конструкции реализовано радиальное течение теплоносителя через шаровую засыпку для минимизации потерь давления. Ранее [3] для модели коллекторной системы с шаровой засыпкой, представленной на рис. 1, были проведены систематизированные экспериментальные исследования потерь давления. Результаты экспериментов получены в виде зависимостей потерь давления от массового расхода теплоносителя.

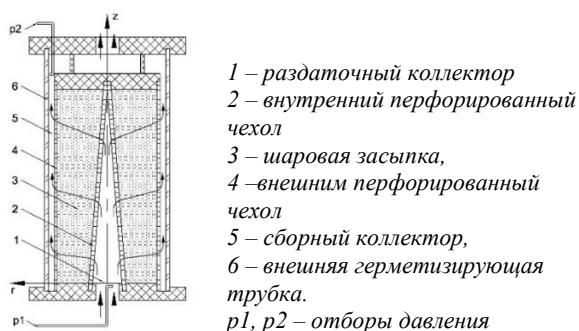


Рис. 1. Схема модели коллекторной системы.

Обобщение полученных результатов по стандартным для шаровых засыпок формулам вызывает затруднения, т.к. есть неопределенность в расчете скорости теплоносителя. В настоящей работе выполнено обобщение данных на основе методики, предложенной в [4]. Согласно этой методики запишем уравнение Дарси-Вейсбаха для случая радиального течения теплоносителя:

$$\Delta p = \xi_{\bar{r}} \frac{\rho}{2} \left( \frac{G}{\rho 2\pi \bar{r} H} \right)^2 \frac{(r_2 - r_1)(r_1 + r_2)^2}{d_{ш} 4r_1 r_2}, \quad (1)$$

где  $\xi_{\bar{r}}$  – коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый по среднему радиусу шаровой засыпки,  $r_1, r_2$  – радиусы чехлов раздаточного и сборного коллекторов,  $\bar{r} = (r_1 + r_2)/2$  – средний радиус шаровой засыпки,  $G$  – массовый расход теплоносителя,  $H$  – высота слоя шаровой засыпки,  $d_{ш}$  – диаметр шарика. Коэффициент, определяющий особенности радиального течения теплоносителя, обозначим  $\chi = \frac{4r_1 r_2}{(r_1 + r_2)^2}$ .

Выражение (1) справедливо для случая, когда внутренний и внешний коллекторы имеют цилиндриче-

скую форму. В нашем случае заменим конический раздаточный коллектор на эквивалентный по площади боковой поверхности цилиндрический (с учетом малого угла конуса), тогда вместо радиуса  $r_1$  будем использовать радиус конуса на половине высоты  $r_{1cp}$ . Для обобщения экспериментальных данных предлагается использовать известную формулу Боговявленского [5] с поправкой на радиальное течение теплоносителя и корректировкой двух констант:

$$\xi_{\bar{r}} = \frac{1,2}{\varepsilon^4} \left( 4 + \frac{10}{Re_{стр}^{0,7}} + \frac{100}{Re_{стр}} \right) \chi, \quad (2)$$

где  $Re_{стр} = \frac{0,45 Re}{\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)}}$ ,  $Re = \frac{G}{\rho 2\pi \bar{r} H} \frac{d_{ш}}{v}$ ,  $\varepsilon$  – пористость

шаровой засыпки.

Результат сопоставления экспериментального значения коэффициента гидравлического сопротивления, полученного с помощью формулы (1) и рассчитанного по формуле (2) представлен на рис.2. Можно видеть удовлетворительное согласие данных, расхождение результатов не превышает 10%.

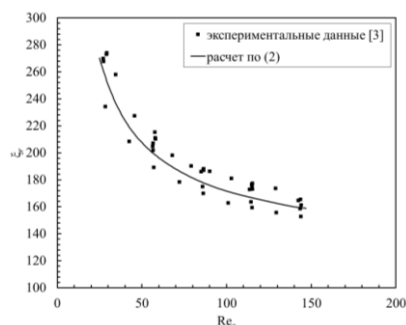


Рис.2. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса.

### Список литературы:

1. Н.Н. Пономарев – Степной, Н.Е. Кухаркин, А.А. Хрулев, Ю.Г. Дегальцев. Перспективы развития микровтэлов в ВВЭР // Атомная энергия, 1999, том 86, вып. 6 с. 443-449
2. И.В. Войтов, В.П. Колос Реакторы с микровтэлами: гидродинамика проницаемых каналов насыпной сборки // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук 2019. Т. 64, №2. С. 190–204.
3. Yu.V Smorchkova, A.N. Varava, A.V. Dedov, A.V. Zakharenkov, A.T. Komov, A.V. Borozdin Investigation of flow parameters in a cylindrical pebble bed and in a model of a fuel assembly with microfuels // MATEC Web of Conferences, 2017, Volume 115, Paper number 06005.
4. В.А.Климова, В.М.Пахалуев, С.Е. Щеклеин Геометрические и гидродинамические характеристики втр с радиальной разницей теплоносителя // Известия вузов.Ядерная энергетика, №1, 2009. – С. 130-134.
5. Боговявленский Р.С. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. – М.: Атомиздат, 1978. 112 с.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-4552.2022.4

УДК 536.24

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НА ТЕКСТУРИРОВАННЫХ БИФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Владимиров В. Ю., Чиннов Е.А., Хмель С.Я.

<sup>1</sup> 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 бифильных поверхностей [1]. Под бифильностью понимается создание локальных гидрофобных областей, играющих роль эффективных центров парообразования, при этом хорошая смачиваемость на окружающей поверхности будет препятствовать раннему развитию кризиса теплообмена, свойственному для однородных гидрофобных поверхностей. В данной работе исследуется теплообмен при кипении в большом объеме текстурированных лазером бифильных медных поверхностях с гидрофобными областями двух видов: микроструктуры в виде «каверн» и параллельные полосы (канавки).

Модифицированные поверхности создавались на головке (диаметром 5 мм) медного сердечника. В сердечнике возле рабочей поверхности располагается термopара. Текстурирование медных поверхностей осуществлялось методом лазерной абляции [2]. После этого для придания бифильных свойств 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 две бифильные поверхности с массивами каверн примерно треугольной формы и квадратной формы с эквивалентным диаметром примерно 100 мкм и шагом 780 мкм. Так же создавались две бифильные поверхности с параллельными полосами (канавками) с шириной порядка 100 мкм и шагом 1 мм, отличием между которыми заключалось в разном количестве проходов лазером для создания одной полосы. На рис. 1 представлены SEM изображения отдельной квадратной каверны и поверхности в ней.

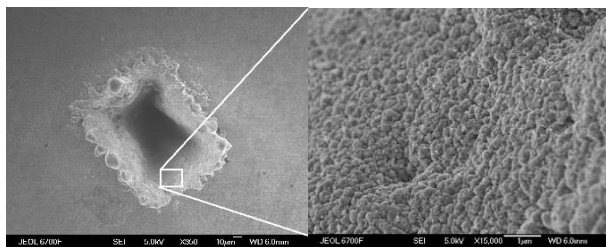


Рис. 1. SEM изображения каверны и ее фрагмента.

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. На теплообмен при кипении на бифильных поверхностях влияют такие факторы как: размер гидрофобных пятен, расстояния между ними (шаг) и относительная площадь гидрофобной поверхности (степень гидрофобности). Интенсивность теплообмена на поверхностях с кавернами примерно одинаковая, хотя их форма и текстура каверн отличается. Общим для них является количество гидрофобных пятен и степень гидрофобности. Похожая ситуация наблюдалась для поверхностей с текстурой «полосы». Сравнение двух видов текстуры показывает, что интенсивность теплообмена на поверхностях «полосы» выше (до 20%), чем на поверхностях «каверны», что вероятно связано с более высокой степенью гидрофобности у «полос», и возможно в целом с большей оптимальностью такой текстуры, по сравнению с «кавернами». Вопрос об оптимальных характеристиках бифильных поверхностей на данный момент остается открытым и требует дальнейших исследований.

При работе с различными модифицированными поверхностями часто остро стоит проблема старения. В данной работе для используемых поверхностей проведены серии экспериментов в течении длительного периода (более двух лет) в ходе которых была продемонстрирована высокая стабильность образцов. Таким образом показана практическая применимость используемой технологии для интенсификации теплообмена при кипении.

### Список литературы:

1. Khmel S. et al. Experimental study of pool boiling on heaters with nanomodified surfaces under saturation //Heat Transfer Engineering. – 2021. – С. 1–19.
2. Boinovich L. B. et al. Pulsed laser induced triple layer copper oxide structure for durable polyfunctionality of superhydrophobic coatings //Advanced Materials Interfaces. – 2018. – Т. 5. – №. 21. – С. 1801099.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 22-19-20090.*



## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛА ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУИ

Вожаков И.С., Хребтов М.Ю., Мулляджанов Р.И.

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

Аэрозоли имеют большее практическое значение и встречаются практически повсеместно в современной жизни: автомобили и самолеты (впрыск топлива); сельское хозяйство (пестициды и гербициды); фармацевтические препараты (пероральные и назальные спреи); изготовление (покраска, распылительная сушка); пищевая промышленность (распылительная заморозка); и косметика (лак для волос, духи). При сгорании размер распыляемой капли, скорость и другие характеристики должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить желаемую проникающую способность распыления и смешивание топлива с воздухом, избегая при этом жидкостных пленок на поверхностях камеры сгорания, которые могут вызвать поверхностные отложения или нежелательные выбросы выхлопных газов (сажа или несгоревшие углеводороды).

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), например, в результате центробежной силы. Сформированные капли претерпевают дальнейшее дробление с образованием еще более мелких капель в результате вторичного распада.

В настоящее время моделирование больших вихрей (LES) в сочетании с моделями турбулентного горения дает исчерпывающую информацию об эффективности работы двигателей. Однако численное моделирование первичного распыления жидкости все еще требует колоссальных численных ресурсов и обычно не используется напрямую.

В настоящей работе выполнено численное моделирование распада закрученной струи в неподвижной атмосфере. Моделирование проведено путем численного решения уравнений Навье-Стокса с использованием кода Basilisk [1]. Отслеживание межфазной поверхности осуществлялось с помощью метода VOF. Для фильтрации мелкомасштабных пульсаций применялся LES метод по модели Vreman [2].

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 керосина происходит из сопла диаметром 0.4 мм в воздушную атмосферу. На выходе из сопла поставлены граничные условия с заданными средними значениями нормальной и касательной составляющих скорости и соответствующими выходными профилям центробежной форсунки. Максимальная продольная скорость составляла 10 м/с. На остальных

границах поставлены граничные условия нулевого градиента для всех компонент скорости. Входная скорость варьировалась для имитации турбулентных пульсаций. Изменение скорости рассчитано согласно модели [3].

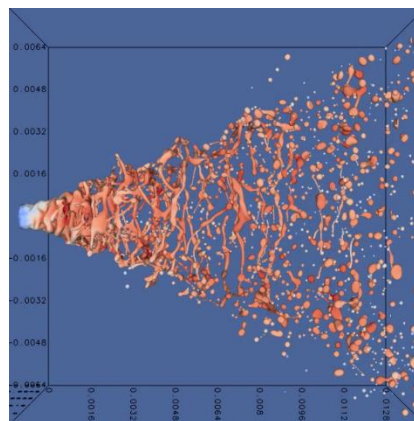


Рисунок 1. Распад закрученной струи.

В результате расчетов были получены квазистационарные состояния истечения, выход на которые контролировался по количеству и распределению капель. Для таких состояний получены средние значения распределения скорости и объемного содержания жидкости по расчетной области. 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 12 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.

### Список литературы:

1. Zhang B., Popinet S., Ling Y. Modeling and detailed numerical simulation of the primary breakup of a gasoline surrogate jet under non-evaporative operating conditions //International Journal of Multiphase Flow. – 2020. – Т. 130. – С. 103362.
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.
3. Klein M., Sadiki A., Janicka J. A digital filter based generation of inflow data for spatially developing direct numerical or large eddy simulations //Journal of computational Physics. – 2003. – Т. 186. – №. 2. – С. 652-665.

Исследование проведено за счет средств гранта  
МД-157.2022.4. Работа над кодом выполнена в  
рамках госзадания ИТ СО РАН.

УДК 536.248

## КОМБИНИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ И СЕТОЧНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В СТЕКАЮЩИХ ПЛЕНКАХ СМЕСИ ФРЕОНОВ

Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н.

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

Интенсификация теплообмена при кипении и испарении за счет структурирования поверхности является ключевым методом повышения эффективности как традиционных, так и обновляемых [1] энергосистем.

Среди различных типов структурированных (в том числе капиллярно-пористых) покрытий, покрытия из проволоочной микросетки с их регулярной геометрической структурой являются одними из самых простых и легко модифицируемых. Данные покрытия обладают рядом преимуществ за счет простоты их монтажа на тепловыделяющие поверхности, низкой стоимости производства, доступности, а также контролируемости геометрических параметров сетки.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных за последнее десятилетие [2], демонстрируют, что сеточные покрытия могут быть эффективным средством интенсификации теплообмена при условии оптимального выбора параметров сеток и количества их слоев, особенно, при использовании многослойных покрытий с большей апертурой верхних слоев – так называемые “градиентные сеточные покрытия” [1] (авторами [1] сообщается об интенсификации теплообмена до 6.6 раз), при применении многослойных покрытий при кипении в большом объеме на вертикальных нагревателях при атмосферном давлении (интенсификация теплообмена до 10 раз) или при субатмосферных давлениях (интенсификация теплообмена до 22 раз) [2]. Также перспективные результаты были получены при комбинировании сеточного покрытия с другими видами обработки поверхности: с микроорезанием, наноструктурированием, а также при заполнении ячеек сетки порошком из микро/наночастиц, [2].

В рамках настоящей работы планируется проведение экспериментального исследования теплообмена на комбинированном (микроорезание с полузакрытыми полостями + наложенная микросетка) покрытии вертикального медного цилиндра диаметром 50 мм, охлаждаемого стекающей пленкой смеси хладонов (при варьировании параметров накладываемой микросетки).

Используются следующие параметры базовой микроструктуры, полученной методом деформирующего резания (МДР), [3]: шаг оребрения – 200 мкм, высота оребрения – 220 мкм, шаг продольной накатки – 160 мкм. Параметры микросетки для первой экспериментальной серии опытов: апертура – 220 мкм, диаметр проволоочки – 100 мкм.

Смесь хладонов R114/R21, используемая в качестве рабочей жидкости, обладает малым поверхностным натяжением, высокой смачиваемостью и малой вязкостью, что делает ее удобной для моделирования процессов теплообмена для широкого класса маловязких технических жидкостей.

При выбранной конфигурации комбинированного покрытия (см. рис. 1) формируются многочисленные микрополости (служащие ловушками для парогазовых включений), а также места возможного утончения стекающей пленки (мениски, формирующие микрослойное течение жидкости вблизи проволоочек) помимо этого, может происходить турбулизация течения пленки за поперечными интенсификаторами. Все это способствует повышению теплоотдачи, как в режиме пузырькового кипения, так и при испарении стекающей пленки жидкости.

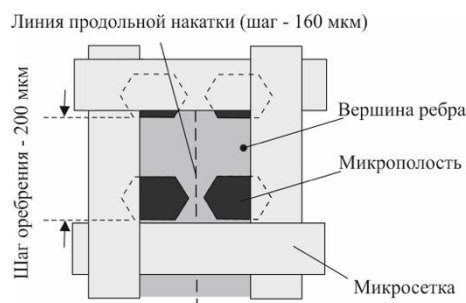


Рис. 1. Схема единичного элемента комбинированного покрытия (микроорезание с полузакрытыми полостями + микросетка).

На момент подачи тезисов подготовлена экспериментальная установка и рабочий участок с комбинированным покрытием №1, проведены предварительные опыты на вертикальном гладком цилиндре и тестовые опыты на цилиндре с покрытием №1 (рис. 1). Данные, полученные на эталонном цилиндре хорошо коррелируют с имеющейся в литературе зависимостью Гогонина для стекающих по гладким поверхностям пленок жидкости [3]. Результаты первых тестовых опытов на покрытии №1 демонстрируют большой потенциал комбинированных покрытий данного типа для интенсификации теплообмена, в первую очередь в режиме пузырькового кипения.

### Список литературы:

1. Zhang, S., Jiang, X., Li, Y. et al., Extraordinary Boiling Enhancement Through Micro-Chimney Effects in Gradient Porous Micromeshes for High-Power Applications, *Energy Conversion and Management*, 2020, V. 209, P. 112665.
2. О.А. Володин, А.Н. Павленко, Н. И. Печеркин. Heat Transfer Enhancement on Multilayer Wire Mesh Coatings and Wire Mesh Coatings Combined with Other Surface Modifications – A Review // *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, V. 30, No. 4, pp. 563–596.
3. 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.

*Исследование выполнено при поддержке мегагранта Минобрнауки РФ № 075-15-2021-575, работы, связанные с созданием МДР-структуры, выполнены в рамках госзадания ИТ СО РАН.*

УДК 532, 66.061, 66.021.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕНА ПРИ ДВУХФАЗНОМ ТЕЧЕНИИ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОКАНАЛЕ Т-ТИПА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА MICRO-LIF

Вострецов С.О.<sup>1,2</sup>, Ягодницына А.А.<sup>1,2</sup>, Ковалев А.В.<sup>1,2</sup>, Бильский А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

В настоящее время применение микроканалов в различных отраслях промышленности и науки является весьма перспективным. Они могут применяться как теплообменники, химические реакторы, микромиксеры и микроэкстракторы. Ввиду своих малых размеров микроканалы обеспечивают высокое отношение площади межфазной границы к объёму, что позволяет достичь высоких интенсивностей различных процессов.

Использование микроканалов в качестве экстракторов способствует нивелированию недостатков экстракторов, используемых на промышленных предприятиях, путём повышения интенсивности экстракции и безопасности устройств. Использование снарядного режима течения позволяет в значительной степени интенсифицировать массообмен за счёт увеличения площади межфазной границы, а также циркуляции скорости внутри снарядов и перемычек.

Основными величинами при изучении массообмена между фазами при двухфазном течении несмешивающихся жидкостей являются: эффективность экстракции %E, показывающая отношение текущей концентрации примеси в фазе к максимально возможному значению, и общий объёмный коэффициент массообмена  $k_L a$ , показывающий интенсивность массообмена на участке канала.

$$\%E = \frac{c}{c^*} \quad k_L a = \frac{\ln\left(\frac{c^{in}-c^*}{c^{out}-c^*}\right)}{\tau\left[\frac{1}{K\varepsilon} + \frac{1}{1-\varepsilon}\right]}$$

где  $C^*$  - равновесная концентрация,  $\tau$  – время пребывания,  $\varepsilon$  – объемная доля,  $K$  – коэффициент распределения.

Существующие экспериментальные исследования массообмена при двухфазном течении несмешивающихся жидкостей в микроканалах либо выполнены интегральными методами измерения, либо характеризуются узкими диапазонами расходов и отношений расходов. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния отношения расходов и общего расхода фаз на эффективность массообмена при течении несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа с гидравлическим диаметром 267 мкм. В качестве дисперсной фазы использовался водный раствор глицерина 70%, в качестве несущей – трибутилфосфат (ТБФ). Экстрагируемой примесью являлся родамин 6Ж - флуоресцентный краситель для метода micro-LIF. Поток создавался с помощью двойного шприцевого насоса и освещался ртутной лампой. Картины флуоресценции записывались на цифровую камеру 4 МПикс.

Разработана методика локального исследования массообмена посредством измерения концентрации в пере-

мычках несущей фазы. Первым этапом является определение равновесной концентрации между фазами. Для этого водоглицериновые растворы родамина 6Ж в различных концентрациях приводились в контакт с несущей фазой в равных объемах и перемешивались на магнитной мешалке. После отстаивания фазы разделялись. С помощью метода micro-LIF строилась калибровочная кривая для водной фазы и определялись остаточные (равновесные) концентрации в разделённых фазах, что позволило рассчитать коэффициент распределения.

Вторым этапом является измерение полей концентраций в перемычках несущей фазы при течении несмешивающихся жидкостей в микроканале. С одного входа микроканала подавался водный раствор глицерина с концентрацией родамина 6Ж 30 мг/л, а с другого – ТБФ. Измерения полей концентраций проводилось в пяти областях микроканала. Концентрации определялись с помощью калибровочной кривой, построенной по разделённым жидкостям, для расчета коэффициента массообмена и эффективности экстракции использовались средние значения концентраций в перемычках.

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что повышение общего расхода фаз приводит к росту эффективности экстракции (см. Рис. 1) и объемного коэффициента массообмена при равных временах пребывания. Это связано с повышением интенсивности вихрей внутри перемычек и снарядов, что влияет на градиент концентрации на межфазной границе. Показано, что увеличение отношения расходов дисперсной и несущей фаз приводит к уменьшению эффективности экстракции и объемного коэффициента массообмена при равных временах пребывания. Полученные экспериментальные данные могут напрямую использоваться при проектировании микроэкстракторов и микрореакторов.

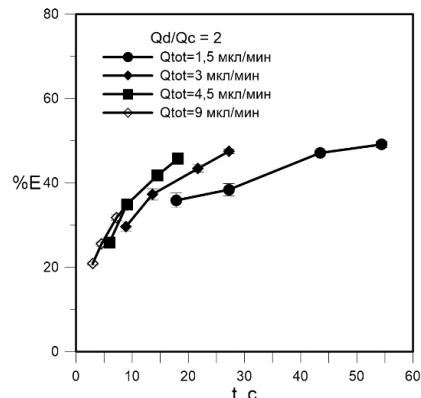


Рис. 1. Зависимость эффективности экстракции от времени прохождения при постоянном расходе дисперсной и несущей фаз.

Работа выполнена при поддержке гранта МК-1230.2021.4.

УДК 532.135; 532.517.4

## ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ УПРУГО-ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ТРУБЕ

Гаврилов А.А.

Красноярский филиал Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
660036, Россия, Красноярск, ул. Академгородок, 50/44

Реальные жидкости могут проявлять одновременно несколько неньютоновских свойств, включая не только упругость, но и пластичность. Влияние упругой релаксации на турбулентную структуру пристеночного течения хорошо изучено. Однако, одновременное влияние эффектов упругости и пластичности изучено слабо. В работе представлены результаты прямого численного моделирования полностью развитого турбулентного течения в прямой круглой трубе ньютоновской жидкости, неупругой жидкости Бингама (BN) и упруго-вязко-пластической среды (EVP).

Вязкоупругая часть напряжения описывается обобщенной моделью Сарамито [1]. Расчёты выполнены для одного числа Рейнольдса  $Re = 10\,000$ , что соответствует значению вязкого числа Рейнольдса для ньютоновской жидкости  $\sim 310$ . Переменными параметрами являются такие свойства среды как пластичность и упругость среды. Эти свойства количественно характеризуются безразмерными числами Бингама  $Bn$  и Вайсенберга  $Wi$ , соответственно. Выполнены расчёты для чисел  $Bn = 0, 1, 2, 4$ , и чисел  $Wi = 0, 0.01, 0.125, 0.25, 0.5$ .

### Результаты моделирования

Турбулентные течения как вязкопластической так и упруго-вязкопластической сред замечательны снижением сопротивления по сравнению с течением ньютоновской жидкости при тех же значениях числа  $Re$ . Снижением сопротивления количественно оценивается коэффициентом  $DR = (1 - \tau_w / \tau_{w,Newt})$ , где  $\tau_{w,Newt}$  – напряжение на стенке для течения ньютоновской жидкости. Для всех рассмотренных режимов снижение сопротивления не превосходит 30 %, что соответствует режиму малого снижения сопротивления (рис. 1). Увеличение пластичности плавно увеличивает падение сопротивления. Можно заметить наличие критического значения числа  $Wi$  ( $\sim 0.5$ ), при котором начинается значимое падение сопротивления.

Отдельно представлены интегральные оценки влияния реологических свойств на подавление турбулентных напряжений, дающих основной вклад в интегральное сопротивление турбулентных течений.

Рассмотрено влияние реологических свойств среды на радиальные распределения полевых величин, полученных в результате сбора статистики.

Упругость и пластичность имеют похожее влияние на турбулентную структуру канального течения. В неньютоновских средах увеличивается анизотропия турбулентных пульсаций в пристеночной области, что связано как с усилением продольных пульсаций так и с подавлением нормальных к стенке пульсаций.

Влияние пластичности на турбулентность имеет ярко выраженный «вязкий» характер. Наличие пластических свойств приводит к эффективной вязкости, монотонно увеличивающейся от буферного слоя вглубь канала. Рост пластичности среды (числа  $Bn$ ) приводит к падению вклада турбулентных напряжений в сопротивление, т.е. к подавлению турбулентного переноса импульса от ядра течения к стенке.

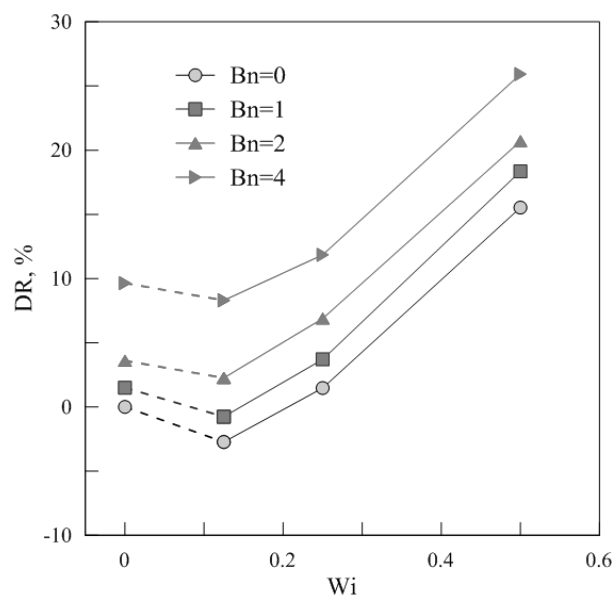


Рис. 1. Зависимость снижения сопротивления  $DR$  от чисел  $Bn$  и  $Wi$ .

В течении сред с релаксацией напряжений наблюдаются оба механизма снижения сопротивления – вязкий и упругий. Однако, существенное падение сопротивления при увеличении упругих свойств среды (числа  $Wi$ ) может быть объяснено развитием релаксационного механизма переноса энергии от упругой компоненты к турбулентной в буферном подслое [2]. Основное влияние упругости на течение осуществляется в пристеночной буферной области. Рассмотрение баланса турбулентной энергии и эффективной вязкости подтверждает упругий механизм снижения сопротивления в упруго-вязко-пластических средах.

Собранные данные могут быть использованы для создания статистической модели турбулентных течений EVP сред для режима малого снижения сопротивления.

### Список литературы:

1. Fraggedakis D., Dimakopoulos Y., Tsamopoulos J., Yielding the yield stress analysis: A thorough comparison of recently proposed elasto-visco-plastic (EVP) fluid models // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 238, (2016), 170–188.
2. Dubief, Y., Terrapon, V.E. & Soria, J. On the mechanism of elasto-inertial turbulence // Phys. Fluids, 25, (2013), 110817.

УДК 621.9

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБТЕКАНИЯ КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ЧИСЛЕ РЕЙНОЛЬДСА  $Re=140\,000$  МЕТОДАМИ PANS И URANS НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ  $k-\varepsilon-Z-A$**

**Гаврилов А.А.<sup>1,2</sup>, Дектерев А.А.<sup>1,2</sup>, Сентябов А.В.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, 660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

Моделирование турбулентных течений в промышленных приложениях зачастую проводится RANS и URANS методами в силу их робастности и экономичности. В то же время, поскольку модель URANS может разрешить только очень большие структуры, предпринимаются попытки повысить чувствительность моделей URANS к неустойчивости, как, например, модели SAS (Scale-Adapting Simulations), или PANS (Partially Averaged Navier-Stokes). Такие методы приближаются к моделированию крупных вихрей (LES), но не включают пространственную фильтрацию и не так строго ограничены разрешением сетки, как метод моделирования крупных вихрей.

Базовые транспортные уравнения PANS модели формулируются для моделируемой энергии турбулентных пульсаций  $k$  и скорости её диссипации  $\varepsilon$  на основе исходной RANS модели. Исходная PANS модель предполагала постоянство параметра  $f_k$ , лежащего в диапазоне от нуля до единицы. Когда параметр разрешения  $f_k$  стремится к нулю, численное решение соответствует прямому численному моделированию турбулентности. Если параметр разрешения стремится к единице, решение PANS модели соответствует решению исходной RANS модели.

Одним из ключевых аспектов PANS вычислений является определение параметра разрешения. В настоящей работе помимо постоянных (заданных) значений параметра  $f_k$  рассмотрен также вариант PANS модели с динамическим параметром разрешения турбулентности  $f_k$ , зависящим от локального характера течения. Идея состоит в оценке устойчивости течения на основе локального сдвигового числа Рейнольдса.

В качестве тестовой задачи было рассмотрено двумерное обтекание одиночного цилиндра. Круглый цилиндр обтекался равномерным потоком жидкости. Число Рейнольдса составляло  $Re = 140\,000$ . На входе задавалось равномерное распределение скорости, нормальной ко входу ( $U_0$ ), а также турбулентные характеристики. Расчетная сетка строилась по принципу окто-дерева, при котором детализация осуществляется разбиением квадратной в сечении ячейки на 4 равных части.

Для исследования были проведены расчеты с помощью подходов URANS и PANS на основе моделей  $k-\omega$  SST и  $k-\varepsilon-Z-a$  как с постоянным, так и с переменным значением параметра  $f_k$ .

Результаты расчета методами URANS и PANS на основе модели  $k-\omega$  SST показали хорошее соответствие расчетам (Pereira, 2019). По интегральным параметрам наилучшее соответствие эксперименту пока-

зывает метод PANS с параметром  $f_k = 0,25$ . При данном значении параметра  $f_k$  расчет наиболее точно воспроизводит суммарные турбулентные пульсации, особенно в дальнем следе (Рис. 1). В то же время, результаты, полученные с помощью переменного  $f_k$ , оказались ближе к результатам URANS.

В варианте метода PANS с непостоянным значением  $f_k$  используется следующая зависимость от локального характера течения:

$$f_k = C_1 \left( \frac{\Delta}{L_S} \right)^{2/3}.$$

Для исследования влияния параметра  $C_1$  были проведены расчеты с помощью подходов PANS и URANS на основе модели  $k-\varepsilon-Z-a$ . Результаты, полученные методом URANS на основе модели  $k-\varepsilon-Z-a$  оказались гораздо ближе к экспериментальным данным по силе сопротивления и пульсациям подъемной силы, чем для модели  $k-\omega$  SST. Были также проведены расчеты методом PANS с различными значениями параметра  $C_1$ , которые показывают его существенное влияние на распределение  $f_k$  и характер нестационарного течения.

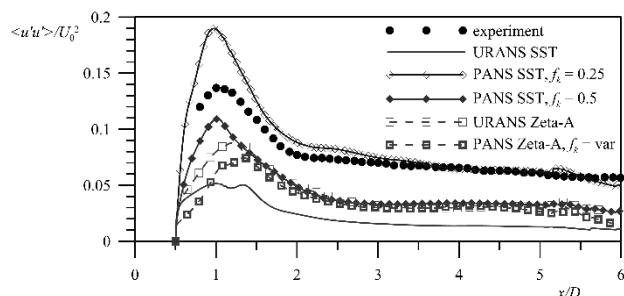


Рис. 1. Пульсации продольной скорости вдоль плоскости симметрии в следе за цилиндром (суммарные)

Список литературы:

- Girimaji, S.S. Partially-averaged Navier–Stokes model for turbulence: a Reynolds-averaged Navier–Stokes to direct numerical simulation bridging method // ASME J. Appl. Mech. 2006. Vol. 73(3), p. 413–421.
- Pereira F.S., Vaz G., Eca L., Girimaji S.S. Simulation of the flow around a circular cylinder at  $Re=3900$  with Partially-Averaged Navier-Stokes equations // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2018. Vol. 69. p. 234–246.
- Pereira F.S., Eca L., Vaz G., Girimaji S.S. On the simulation of the flow around a circular cylinder at  $Re = 140,000$  // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2019. Vol. 76. p. 40–56.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-41-240004.

УДК 532.517

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

**Гармаев С.С.<sup>1</sup>, Бернар А.<sup>1</sup>, Мулляджанов Р.И.<sup>2</sup>, Яковенко С.Н.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

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

Модели RANS-подхода в связи с вычислительной эффективностью широко используются для описания турбулентных течений. Универсальность и точность RANS-моделей часто оказывается недостаточной для приложений. Аппроксимации анизотропии напряжений Рейнольдса (RSA) можно улучшить [1], применяя методы машинного обучения (ML) на эталонных данных измерений, подходов DNS, LES, требующих чрезмерных ресурсов. В работе сравниваются методы ML для определения RSA с использованием данных DNS, LES для течений в каналах различной геометрии: программирование экспрессии генов (GEP) [2], нейронная сеть с тензорным базисом (TBNN) [3], случайный лес с тензорным базисом (TBRF) [4], метод повышения градиента с тензорным базисом из TBNN [5].

Сначала рассмотрен поток между параллельными стенками при различном числе Рейнольдса  $Re_\tau = u_\tau d/\nu$ , основанном на скорости трения на стенке  $u_\tau$  и полувысоте канала  $d$ , где средняя скорость  $U$ , направленная вдоль оси  $x$ , зависит только от нормали к стенке  $y$ . Расчет выполнен в OpenFOAM с  $k-\omega$  моделью турбулентности. Вариант 1 для RSA – модель Буссинеска (BM)  $b_{ij} = -(0.09/\omega)S_{ij}$ , где  $S_{ij} = (1/2) \cdot (\partial U_i/\partial x_j + \partial U_j/\partial x_i)$  – тензор деформации,  $U_i$  – вектор средней скорости, RSA-тензор  $b_{ij} \equiv a_{ij}/(2k) \equiv \tau_{ij}/(2k) - (1/3)\delta_{ij}$  включает в себя турбулентную кинетическую энергию  $k$  и напряжения Рейнольдса  $\tau_{ij}$ . В варианте 2 предсказываем RSA после ML-обучения, удаляем паразитные осцилляции с помощью гауссового фильтра, подставляем  $a_{ij}$  или  $b_{ij}$  в RANS-решатель и получаем новые поля  $U(y)$  и  $k(y)$ . Предсказанные профили  $b_{ij}(y)$  показывают [5] улучшение поведения, с приближением к эталонным данным DNS. Возможные отклонения и случайные колебания, согласно [4], устраняются комбинированной вставкой  $(a_{ij})^{ML}$ , с добавкой базового BM-распределения  $(a_{ij})^{BM}$ , как  $\tau_{ij} = (2/3)\delta_{ij} + (1 - \gamma)(a_{ij})^{BM} + \gamma(a_{ij})^{ML}$ , где  $\gamma$  постепенно увеличивается от 0 до 0,8 с ростом итераций.

Компоненты RSA, полученные из DNS, базового RANS-подхода и ряда ML-методов, показывают, что TBRF дает более близкое согласие с эталонным решением DNS (рис. 1), поэтому используется для дальнейшей подстановки в RANS-решатель и обозначается как RANS+ML. Полученное распределение скорости для RANS+ML в пристеночной области оказывается ближе к профилям DNS, чем базовое RANS-решение (рис. 2). Для сравнения также приведены результаты RANS+DNS, где вставленные в решатель значения  $\tau_{ij}$  берутся непосредственно из данных DNS, получаясь близкими к кривым RANS+ML. Кроме исследования интерполяционной способности ML-алгоритма при  $Re_\tau = 550$  (рис. 1, 2), проверена и возможность экстраполяции при  $Re_\tau = 8000$ , также показавшей улучшение у стенки для подходов и RANS+DNS, и RANS+ML.

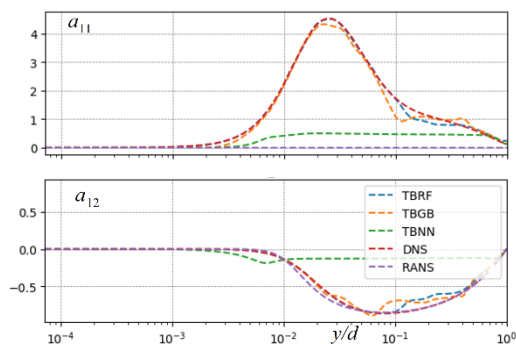


Рис. 1. Компоненты  $a_{11}$  и  $a_{12}$ , обученные при  $Re_\tau=180, 395, 950, 1000, 2000, 5200$  и предсказанные для  $Re_\tau=550$ .

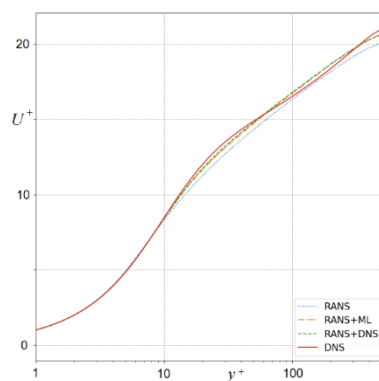


Рис. 2. Профиль средней скорости  $U^+ = U/u_\tau$  при  $Re_\tau=550$ .

Далее, технологии машинного обучения применяются к 2D-течениям в каналах с выступами, квадратном канале, а также для улучшения модели турбулентного потока скаляра в случаях тепломассопереноса.

**Список литературы:**

1. Duraisamy K., Iaccarino G., Xiao H. Turbulence modeling in the age of data // Annu. Rev. Fluid Mech. 2019. Vol. 51. P. 357–377.
2. 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.
3. Ling J., Kurzawski A., Templeton J. Reynolds averaged turbulence modelling using deep neural networks with embedded invariance // J. Fluid Mech. 2016. Vol. 807. P. 155–166.
4. Kaandorp M., Dwight R.P. Data-driven modelling of the Reynolds stress tensor using random forests with invariance // Comput. Fluids. 2020. Vol. 202. # 104497. P. 1–16.
5. Гармаев С.С., Яковенко С.Н. Усовершенствование моделей турбулентности при помощи методов машинного обучения // XXXVII Сибирский теплофизический семинар, 14–16 сентября 2021 г. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2021. С. 9.

*Работа включает результаты диссертаций магистрантов ММФ НГУ (Гармаев С.С., Бернар А.) и поддержана РНФ (проект 22-19-00587).*

УДК 536

## НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ ИСПАРЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ

Гатапова Е.Я.<sup>1,2</sup>, Граур И.А.<sup>3</sup>, Батуева М.А.<sup>1,2</sup>, Вольф М.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1, gatapova@itp.nsc.ru

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

<sup>3</sup>Aix-Marseille Universite, CNRS, IUSTI UMR 7343, 5 rue E. Fermi, 13453, Marseille, France

<sup>4</sup>Eindhoven University of Technology, PO Box 513, 5600MB Eindhoven, the Netherlands

Для оптимизации размеров высокоэффективных охлаждающих устройств с микронными характеристиками размерами, требуются новые фундаментальные знания о процессах с фазовыми переходами на микромасштабе. Испарение является одним из наиболее эффективных способов интенсификации теплообмена в стесненных условиях. Однако разработка эффективных способов моделирования процесса испарения и конденсации требуют четкого понимания применимости различных существующих подходов, используемых для моделирования фазовых переходов на микромасштабе. Внутри слоя Кнудсена макроскопические параметры имеют сильные градиенты, особенно когда скорость испарения не так мала по сравнению с наиболее вероятной скоростью газа, вследствие чего температура поверхности жидкости и соответствующее давление насыщения могут отличаться от температуры и давления на верхней границе слоя Кнудсена (рис. 1). Тем не менее, оба параметра, давление и температура, на наномасштабе непрерывно меняются в этом слое, и даже очень малая его толщина слоя Кнудсена может создать впечатление в континуальном макроскопическом масштабе, что оба параметра претерпевают скачок.

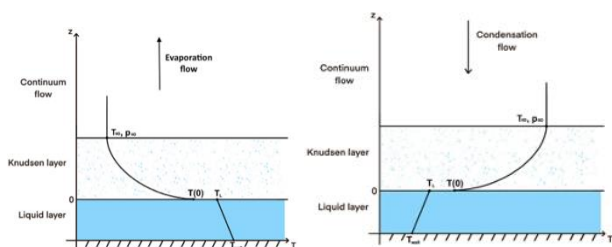


Рис. 1. Схема задачи для процессов испарения (слева) и конденсации (справа).

В этой работе проведено численное моделирование испарения и конденсации одноатомного пара с применением кинетического S-модельного уравнения, методов молекулярной динамики и метода моментов. Обнаружено хорошее согласие между результатами, полученными этими тремя методами для одноатомных газов (рис. 2, [1]). Также проведено сравнение результатов с известными литературными данными [2] и повсеместно применяющимися аналитическими формулами для процесса испарения и конденсации. Показано, что моментный метод обладает большим потенциалом для эффективной оценки потока масс для процесса испарения и конденсации, учитывает законы сохранения массы, импульса и энергии через слой Кнудсена. Этот метод не имеет аналитического решения в случае конденсации, в отличие от процесса испарения, и три уравнения сохранения

должны решаться численно. Линейная формула Шраге завышает скорость конденсации и испарения при малых скоростях и занижает ее при более высоких. Мы также проверили наши подходы посредством сравнения с экспериментальными данными по конденсации ртути в широком диапазоне чисел Маха вплоть до 0,85. В работе также обсуждается существование обратного градиента температуры, а также причина его появления и эволюция для различных экспериментальных условий.

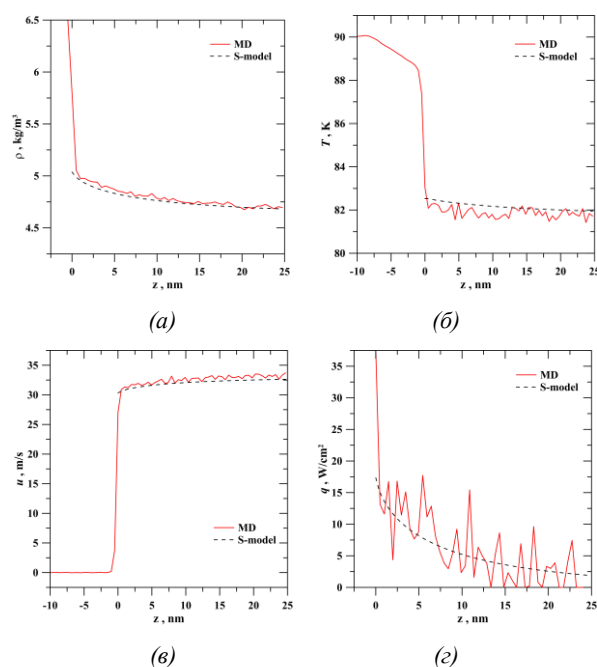


Рис. 2. Сравнение результатов, полученных методами молекулярной динамики с численными результатами S-модельного кинетического уравнения для процесса испарения с числом Маха  $M=0,2$ : (а) плотность, (б) температура, (в) скорость и (г) тепловой поток.

### Список литературы:

1. Graur I.A., Gatapova E.Y., Wolf M., Batueva M.A., Non-equilibrium evaporation: 1d benchmark problem for single gas// International Journal of Heat and Mass Transfer 181 (2021) 121997.
2. Liang Z., Biben T., Keblinski P., Molecular simulation of steady-state evaporation and condensation: Validity of the Schrage relationships// International Journal of Heat and Mass Transfer 114 (2017) 105–114.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 20-19-00722).

УДК 532.517

**НОВАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ТУРБУЛЕНТНО-ВОЛНОВОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ**

**Гешев П.И.**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1  
Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, у. Пирогова, 2

На пленке жидкости, стекающей по наклонной поверхности, с возрастанием расхода появляются большие 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:

$$v_t = v \frac{y_+^3}{A/D + By_+^2}, \tag{1}$$

где  $v$  - вязкость,  $y_+ = v_* y / \nu$ ,  $A = 1015$ ;  $B = 2,5$ ,  $D = 1 - \exp[-(y_+ - \delta_0)^2 / \delta_*^2]$ ,  $\delta_0 = 10$ ,  $\delta_* = 80$ ,  $v_*$  - динамическая скорость. Фактор  $D$  учитывает демпфирование турбулентного переноса при малых расстояниях  $y_+$  от стенки в области вне вязкого подслоя.

Толщина пленки рассчитывается из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} q = 0. \tag{2}$$

где  $q = \int_0^h u dy$  - расход жидкости в пленке. Из уравнения Навье-Стокса (для продольной компоненты скорости) было выведено уравнение для расхода жидкости  $q$ .

$$\frac{h^2}{\nu} \gamma \left[ \frac{\partial q}{\partial t} + \chi \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q^2}{h} \right) \right] + q = q_*, \tag{3}$$

где  $\gamma$ ,  $\chi$  - некие константы

$$q_* = \int_0^h \frac{\tau_g (h-y) + [\rho(g_x + g_y h') + \sigma h_g'''] (h-y)^2}{\rho(\nu + \nu_T(y))} dy$$

где  $\tau_g$  - трение потока газа,  $\sigma$  - поверхностное натяжение,  $g_x$ ,  $g_y$  - две компоненты поля тяжести (штрих означает дифференцирование по  $x$ ).

Выведенная система уравнений описывает турбулентно-волновое движение пленок жидкости при произвольных числах Рейнольдса.

В работе изучаются также нелинейные волны, текущие по нижней стороне наклонной поверхности. Уравнение в этом случае получено из (2) при  $q = q_*$  (без учета членов с инерцией) и в безразмерном форме имеет вид :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ F Ka^{1/3} h^2 f_1 + Ka^{1/2} h^3 f_2 \left[ \sin \alpha + \cos \alpha \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial^3 h}{\partial x^3} \right] \right\} = 0$$

где введены критерий Капицы и фактор трения

$$Ka = \frac{(\sigma / \rho)^3}{g \nu^4}, \quad F = \frac{\tau_g}{\rho g \Lambda}$$

и два безразмерных интеграла, определяемые через турбулентную вязкость

$$f_1 = \int_0^1 \frac{(1-z) dz}{1 + \varphi(\delta_+ z)}; \quad f_2 = \int_0^1 \frac{(1-z)^2 dz}{1 + \varphi(\delta_+ z)},$$

В определенном диапазоне параметров получены стационарные нелинейные волны большой амплитуды на пленке жидкости, стекающей по нижней стороне наклонной поверхности.

**Список литературы:**

1. Бобылев А.В., Харламов С.М., Гузанов В.В., Квон А.З., Маркович Д.М. Волновая структура пленок жидкости 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.



УДК 532.5, 536.24, 536.33

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЁННОГО КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА  
В ГЕРМЕТИЧНЫХ БЛОКАХ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ НАГРЕВАТЕЛЯМИ  
ОБЪЁМНОГО ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ**

**Гибанов Н.С., Шеремет М.А.**

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

Исследование сложного теплообмена в различных энергетических системах в настоящее время является актуальной задачей. В связи с интенсивным развитием области микроэлектроники растут требования к производительности и эргономике электронных приборов. Усложняется задача проектирования печатных плат, в том числе эффективного расположения термонагруженных элементов системы на печатной плате. Для решения данной задачи необходимо учитывать максимальную интенсивность генерации тепла нагревательным элементом, его геометрические и теплофизические характеристики. Причём подобный анализ необходимо проводить совместно с определением гидродинамических характеристик, а также при учёте радиационных свойств рассматриваемой системы. В связи с обилием различных параметров, определяющих наиболее комфортные условия для работы того или иного электронного устройства, необходимо проводить численные и экспериментальные исследования сложного теплообмена.

В представленной работе были проведены численные исследования сложного теплообмена в замкнутой квадратной полости при наличии двух локальных источников постоянного объёмного тепловыделения (Рисунок 1). Левая и правая стенки являлись изотермическими охлаждающими, остальные стенки – адиабатические. На нижней стенке располагались два локальных источника постоянного тепловыделения. Внутри полости располагался газ с постоянными теплофизическими свойствами, удовлетворяющий приближению Буссинеска. Математическое описание процессов теплопереноса в исследуемой области может быть представлено в виде [1–3]:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \left( \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \frac{\partial \Theta}{\partial X} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Theta}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{Pr \cdot Ra}} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right) + Q \quad (3)$$

Определение поля температуры в локальных источниках энергии производилось с использованием соотношения:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{a_w / a_f}{\sqrt{Pr \cdot Ra}} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} + Q \right) \quad (4)$$

Для определения плотности потока эффективного излучения и плотности радиационного потока использовались следующие соотношения:

$$Q_{rad} = R_k - \sum_{i=1}^N F_{k-i} R_i \quad (5)$$

$$R_k = (1 - \varepsilon_k) \sum_{i=1}^N F_{k-i} R_i + \varepsilon_k (1 - \zeta)^4 \left( \Theta_k + 0.5 \frac{1 + \zeta}{1 - \zeta} \right)^4 \quad (6)$$

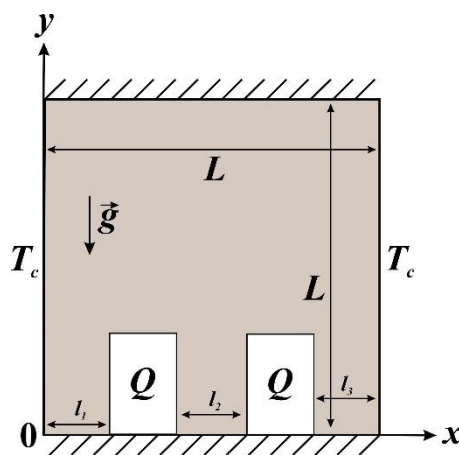


Рисунок 1. Область исследования

Моделирование процессов теплообмена проводилось при следующих значениях определяющих параметров:  $0 \leq \varepsilon \leq 0.9$ ;  $0 \leq \tau \leq 10000$ ;  $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ ;  $Pr = 0.7$ ;  $\lambda_{hs} = 150 \frac{Вт}{м \cdot К}$ ;  $\lambda_f = 0.026 \frac{Вт}{м \cdot К}$ ;  $a_{hs} = 88 \cdot 10^{-6} \frac{М^2}{с}$ ;  $a_f = 19 \cdot 10^{-6} \frac{М^2}{с}$ .

В результате численного моделирования была проведена оценка влияния высоты нагревательных элементов и их расположения на распределения термодинамических характеристик. Кроме того, проанализирована эволюция тепловых полей и структуры потока в полости.

Список литературы:

1. Kuznetsov G.V., Al-Ani M.A. and Sheremet M.A. Numerical simulation of two-phase closed thermosiphon // *Journal of Energy and Power Engineering*. 2011. N.5. P. 227-232.
2. Гибанов Н.С., Шеремет М. А. Численное исследование сложного естественно-конвективного теплообмена в замкнутой полости с треугольным элементом объёмного тепловыделения // *Вестник Пермского университета. Физика*. – 2018. – Вып. 4 (42). – С. 52-59.
3. Martyushev S.G., Sheremet M.A. Numerical analysis of conjugate natural convection and surface radiation in an enclosure with local heat source // *Computational Thermal Sciences*. – 2013, – Vol. 5. – P. 11–25.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

УДК 534.29

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ РЕСТРУКТУРИЗАЦИИ МОЛЕКУЛ ОЛИГОМЕРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Голых Р.Н., Хмельёв В.Н., Минаков В.Д., Барсуков А.Р., Шакура В.А., Маняхин И.А., Ильченко Д.А.

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова,  
659305, Россия, Алтайский край, г. Бийск, ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, 27

Представляемая работа направлена на решение проблемы прогнозирования режимов воздействия механических колебательных возмущений, необходимых для получения жидких и твёрдых материалов с заранее заданными, а иногда и с взаимоисключающими свойствами (например, одновременно высокая прочность на растяжение и низкая плотность твёрдых материалов; одновременно низкая вязкость и высокая адгезионная способность жидкостей) на основе полимеров (речь идёт о воздействии на неотверждённые полимеры в жидком агрегатном состоянии – олигомеры).

Воздействие механическими колебательными возмущениями позволяет:

- существенно снизить необходимое количество вводимой химической добавки, являющейся расходным материалом, для достижения требуемых свойств целевого материала;
- увеличить скорость взаимодействия добавки с полимером;
- дополнительный фактор воздействия - кавитационно-акустическое поле позволяет улучшать одновременно несколько свойств материала.

Другая особенность механических колебательных возмущений – они способны управлять отдельными свойствами целевого материала (можно плавно изменять свойства путём подбора режимов и продолжительности воздействия) без применения расходных материалов. Например, такое воздействие позволяет эффективно снижать вязкость неотверждённых полимеров (до 5 раз и более за время 1...2 мин) без применения химических добавок и нерастворимых в полимере жидкостей (например, без добавления воды в нефть для получения водонефтяной эмульсии, которая менее вязкая, чем исходная нефть). При этом для отдельных видов полимеров (например, фенолформальдегидной смолы) наблюдается отложенный эффект – вязкость повышается более чем на 20% относительно исходного неотверждённого полимера после снятия воздействия.

Авторами проведено исследование физических механизмов влияния механических колебательных возмущений (рассматривались, в основном, высокочастотные колебательные возмущения в ультразвуковом диапазоне) на структуру молекул олигомера,

Выработано формальное математическое описание структуры молекулы олигомера. Предложенное формальное описание основано на теоретико-множественном подходе, учитывает разветвлённость структуры макромолекулы и позволяет полностью определить координаты каждого мономерного звена (имеются ввиду координаты центров масс каждого мономерного звена) для дальнейшего решения уравнений

движения молекул, которые будут описывать тепловое движение и разрыв связей в ходе действия механических колебательных возмущений.

Разработана система уравнений динамики отдельного мономерного звена молекулы олигомера. Создан программный модуль решения системы уравнений динамики мономерных звеньев каждой молекулы при изменении макроскопических параметров ансамбля молекул в соответствии с механическими колебательными возмущениями (линейное синусоидальное изменение давления, ударные волны давления, генерируемые при схлопывании кавитационных пузырьков, а также концентрация кавитационных пузырьков, генерирующих ударные волны). Предложенная численная реализация модели рассматривает движение молекул в ограниченной области в форме параллелепипеда. На границах параллелепипеда заданы периодические граничные условия, которые учитывают пространственную периодичность ансамбля молекул материала.

С помощью интегральных оценок доказано утверждение, что когда мономерные звенья разошлись друг от друга на критическое расстояние и при этом, когда скорость расхождения мономерных звеньев в момент их пребывания на данном критическом расстоянии  $v_{cr}$  друг от друга также превышает критическую  $V_{cr}$  (для эпоксидного связующего  $V_{cr} > 1000$  м/с), то вне зависимости от дальнейшего положения набегающего третьего звена, движение исходных мономерных звеньев оказывается инфинитным, т.е. связь между мономерными звеньями оказывается разорванной.

Получена конфигурация ансамбля молекул при различных параметрах механических колебательных возмущений (частота и амплитуда колебаний давления, характер возмущения – линейное синусоидальное, микроударные волны, генерируемые при схлопывании кавитационных пузырьков).

Численными расчётами установлено, что воздействие синусоидальными колебаниями в кавитационном режиме с частотой 22 кГц интенсивностью 10 Вт/см<sup>2</sup> позволяет уменьшить наиболее часто встречающееся количество мономерных звеньев в макромолекуле с 35 до 26 за 5 мин. Воздействие с увеличенной интенсивностью 25 Вт/см<sup>2</sup> позволяет за 5 мин уменьшить наиболее часто встречающееся количество мономерных звеньев с 35 до 17 (почти в 2 раза). Воздействие с более высокой частотой 44 кГц первичных синусоидальных колебаний позволяет достичь аналогичного результата за время менее 3 мин.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Гранта Президента РФ № МК-5387.2021.1.1.*

УДК 536.246

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ВОДНО-ЭТАНОЛОВОЙ СМЕСИ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ И КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПОТОК СУХОГО ВОЗДУХА

Горбачев М.В.<sup>1</sup>, Макаров М.С.<sup>1,2</sup>, Терехов В.И.<sup>1,2</sup>, Сюзаев А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

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

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования динамики смачивания поверхности титановых пластин с модифицированной капиллярно-пористой поверхностью и изменения ее температуры при испарении смеси этанол/вода различного состава. Пластина омывалась потоком сухого воздуха из воздушной магистрали. Угол установки по отношению к потоку составлял 90° и 45°. Скорость потока воздуха устанавливалась равной 3 и 5 м/с. Объемная концентрация этанола в воде устанавливалась равной 0; 19,1; 38,2 и 57,3%об.

Схема расположения датчиков приведена на рис. 1. Температура смеси в кювете стабилизировалась на уровне 18°С на протяжении всего эксперимента. Как видно из термограмм (см. рис. 2), на распределение температуры вдоль пластины существенное влияние оказывает процесс теплопроводности. Фактически исследуемые факторы приводят лишь к сдвигу в распределении температуры, сформированном за счет теплопроводности. Наличие смоченной капиллярно-пористой поверхности приводит к понижению температуры стенки и более равномерному распределению температуры по длине модифицированной поверхности. Увеличение концентрации этанола приводит к понижению температуры модифицированной поверхности, однако распределение температуры становится не стационарным из-за изменения состава жидкости, заполняющей канавки поверхности. Увеличение скорости потока – конвективного подвода теплоты – приводит к сдвигу распределения температуры в область более высоких значений, но не приводит к качественному изменению в распределении температуры по длине модифицированной поверхности.

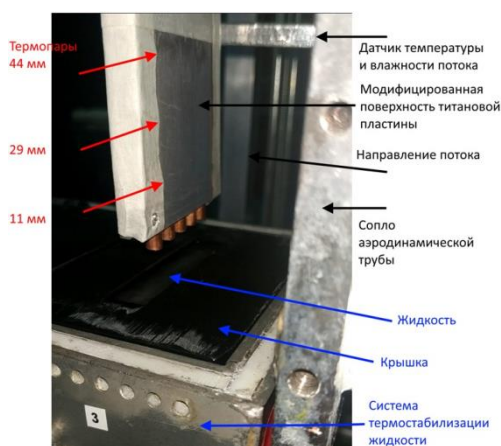


Рис. 1. Схема расположения датчиков и элементов рабочего участка

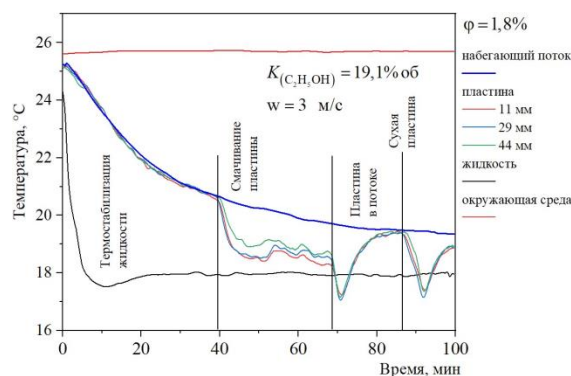


Рис. 2. Термограмма эксперимента по испарению с модифицированной поверхности титановой пластины смеси вода/этанол с концентрацией этанола 19,1% по объему в поток сухого воздуха

На рис. 3 результаты обработки данных эксперимента при испарении жидкости с поверхности пластин расположенных под углом 45° и 90° по отношению к оси потока. На врезке представлено тепловизионное изображение. Как следует из приведенных данных уменьшение угла наклона пластины приводит к увеличению продолжительности цикла испарения и к увеличению глубины охлаждения поверхности пластины, что, по-видимому, связано с уменьшением теплоподвода от конвективного потока воздуха с ростом толщины пограничного слоя.

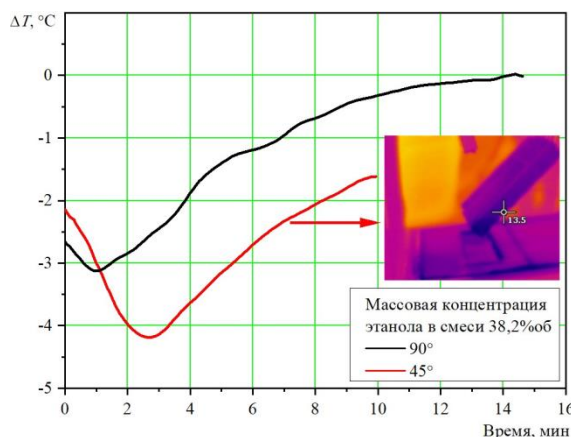


Рис. 3. Влияние угла установки по отношению к потоку на цикл испарения жидкости: скорость потока 3 м/с

В работе приведены результаты экспериментов по влиянию угла ориентации модифицированных пластин относительно оси потока на процесс испарения водо-спиртовой смеси. Показано, что уменьшение угла наклона пластины приводит к увеличению продолжительности цикла испарения и к увеличению глубины охлаждения поверхности пластин.

УДК 53.03

## РАЗВИТИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРИ ТРУБЫ РАНКА С ПОМОЩЬЮ ТЕРМИСТОРОВ

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

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

В данной работе, исследуется эффект Ранка-Хилша. Данный эффект известен давно, однако, до сих пор нет полной картины почему он происходит. Расчетные данные по известным моделям показывают меньшее температурное разделение воздуха, чем показывает эксперимент. Если охлаждение центральной части потока получается объяснить, то нагрев периферийного потока на данный момент не получилось.

В работе поставлена фундаментальная задача экспериментальной проверки гипотезы развития гидравлической неустойчивости, сопровождающейся ударной перестройкой потока за счет каскада гидравлических прыжков, на определенных участках трубы в широком диапазоне режимных параметров. Данная гипотеза была выдвинута в работе[1].

Один из этапов проверки данной гипотезы, это экспериментальное исследование того, как растет периферийная температура на стенках трубы при отдалении от завихрителя и приближении к «горячему» выходу установки. Для данной задачи нужны были датчики температуры на стенке трубы. В работе были использованы полупроводниковые термисторы сопротивления, которые нужно было поместить на стенку трубы Ранка.

Датчики были подсоединены к АЦП Ltr-seu-1-4, именно там собирались данные для дальнейшей обработки. Была написана программа для данного АЦП, которая выводит показания сопротивления каждого из датчиков.

Первым этапом работы была тарировка датчиков. Проводилось это с помощью сравнения показания сопротивления датчика, которое выдавала программа и показания термометра, который был погружен в ту же емкость с водой, что и термисторы. Условная схема тарировки датчиков представлена на рисунке 1. Для того чтобы температура во всей емкости была одинаковой был включен барботаж.

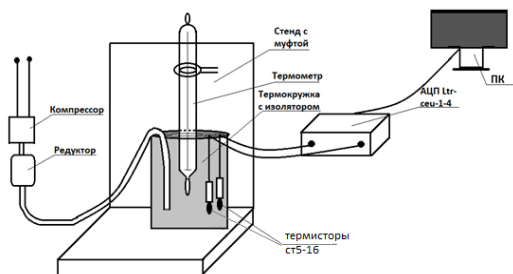


Рис. 1. Схематическое изображение процесса тарировки датчиков.

Далее были построены графики соответствия сопротивления датчиков и температуры в емкости. И затем в программе Microsoft excel получены полиномы пересчета сопротивления датчика в температуру. Полиномы были внесены в программу. Тем самым, полученная программа выдавала значения температур.

Вторым этапом проводился эксперимент. Датчики располагались через каждые 20мм для трубы с длиной 450мм. Было решено делать заподлицо, так как любое тело, вносимое в трубу, сильно нарушает его. Погрешность показания датчиков составляла около 0,3 градуса, что достаточно для целей эксперимента. После установления температуры в течение 15 минут при задании режима. Мы получали набор температур на стенке трубы. Течение в трубе ранка сильнозавихренное и очень прецессирующее. Несмотря на это показания датчиков на стенке канала при установлении режима изменялись не более чем на 1 градус. Пример данных полученных в эксперименте показан на рисунке 2.

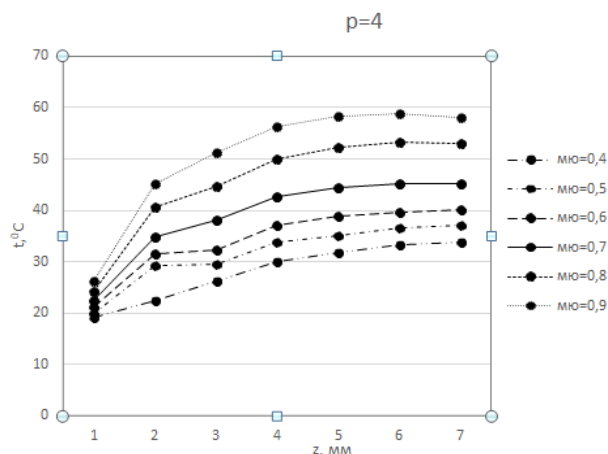


Рис. 2. Пример выходных данных.

Развитие данного метода для трубы Ранка позволило получить нужные данные по температуре на стенке вихревой трубы с точностью в 1-2 градуса. Эти данные нуждаются в обработке и могут пролить свет на явление нагрева периферийного потока в трубе Ранка-Хилша

### Список литературы:

- И.К. Кабардин, Н.И. Яворский, В.Г. Меледин, М.Х. Правдина, М. Р. Гордиенко. Сравнительный анализ режимов в трубах Ранка с круглым и квадратным сечением рабочего канала// ПМТФ. 2020. Т. 61, № 1(359). С. 43-52.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-29-01262

УДК 519.876.5

## РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ИЗОЛИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Гордин С.А., Соснин А.А., Журавлев Д.О., Хряпенко К.Д.

ФГБОУ ВО Комсомольский-на-Амуре государственный университет,  
681013, Россия, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27  
gordin@knastu.ru

Система централизованного теплоснабжения является сложной системой, для моделирования отдельных элементов которой используются модели из области газодинамики, гидродинамики, термодинамики и теории горения. Отдельные элементы системы (насосы, точки, теплообменные аппараты) имеют достаточно хорошие модели, но, как правило, рассматриваются независимо или их взаимное влияние рассматривается в статике [1–3].

Для небольших систем теплоснабжения характерным является отсутствие больших инерционных масс и поэтому в таких системах все элементы оказывают друг на друга достаточно сильное влияние, а все проходящие в системе процессы имеют динамический характер. Поэтому для корректного исследования проходящих в таких системах процессов необходимо рассматривать единую модель, включающую в себя все элементы системы.

Прямая задача расчёта системы теплоснабжения предполагает известными массу сжигаемого топлива, объема подаваемого в топку котла воздуха, объема прокачиваемого по системе теплоснабжения теплоносителя и количества требуемого потребителю тепла. При этом целью прямой задачи является подбор оборудования, обеспечивающего работу системы теплоснабжения, в том числе при предельных нагрузках.

В процессе эксплуатации, когда оборудование системы теплоснабжения работает в режиме частичной нагрузки, необходимо решать обратную задачу: определить минимально требуемую производительность различного оборудования, обеспечивающего задачу теплоснабжения при условии выполнения требований по надёжности.

Решение обратной задачи не может быть сведено к набору отдельных задач для каждого типа оборудования, поскольку система теплоснабжения является сложным комплексом со множеством внутренних связей.

Для достаточно простой системы теплоснабжения (элементарный случай), состоящей из одного котла, сети без разветвлений и одного потребителя обратная задача может быть решена аналитически на основе системы, составленной из фундаментальных уравнений теплопередачи, неразрывности и уравнения движения. Построенная нашим авторским коллективом модель для такой простой системы состоит из 35 уравнений [4].

Эта система уравнений позволяет при заданных параметрах воздуха на входе в котел, атмосферы, состава топлива и его теплоте сгорания, номинальных напорах дутьевого насоса, дымососа, сетевых насосов и насоса подпитки, геометрических и физических параметрах котла и труб однозначно определить все расчётные параметры при заданных допущениях.

Корректность построенной модели была проверена путем сопоставления результатов расчёта с результатами измерений, проведенных на котельной с. Селихино Комсомольского района Хабаровского края. С учетом сделанных допущений и определения параметров системы теплоснабжения по укрупненным показателям, отклонение между расчетными и измеренными параметрами составило 1,8...4,7%.

Система теплоснабжения с несколькими потребителями и достаточно простой сетью теплоснабжения может быть приведена к элементарному случаю методом «эквивалентных сечений», при котором сеть и потребители заменяются некоторой эквивалентной сетью, характеристики которой совпадают с заданной, возможно в некотором диапазоне нагрузок.

Решение задачи в общем виде аналитическим способом хотя и технически возможно, но не целесообразно: в системе теплоснабжения будет слишком большое количество различных элементов с неизвестными точными характеристиками. Для общего случая более правильным будет расчёт параметров по укрупненным показателям с последующим уточнением на основе данных измерений в ключевых точках.

Для упрощения вычислительной сложности решения рассматриваемой обратной задачи возможно использование систем имитационного моделирования, например, AnyLogic. Это позволит свести решение системы уравнений к численным методам подбора значений параметров.

Более сложной представляется задача учёта в модели системы теплоснабжения переходных и инерционных процессов теплопереноса. Одним из перспективных направлений для решения данной задачи является задача построения «цифрового двойника» системы теплоснабжения, позволяющего решить не только задачу описания состояния системы, но и задачу управления оборудованием.

### Список литературы:

1. Валландер С.В. Лекции по гидроаэродинамике. Учеб. пособие. Л.: из-во Ленингр. ун-та. 1978.
2. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Издательство НПО ЦКТИ, СПб, 1998. – 256с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. – 736 с.
4. Гордин С.А. Имитационное моделирование динамических процессов в системах централизованного теплоснабжения / Гордин С.А., Соснин А.А., Шамак В.А., Хряпенко К.Д. // Информатика и системы управления, 2022, №3(73)

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 22-29-01232,  
<https://rscf.ru/project/22-29-01232>.*

УДК 532.582.92

## ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ В НЕПОДВИЖНОЙ ЖИДКОСТИ В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ

Гореликова А.Е.<sup>1,2</sup>, Кашинский О.Н.<sup>1</sup>, Чинак А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, у. Пирогова, 2  
gorelikova.a@gmail.com

Газовые пузырьки, всплывающие в неподвижной или движущейся жидкости, могут оказывать значительное влияние на теплообмен за счет перемешивания пристенных слоев жидкости. Наиболее распространены работы по исследованию вертикальных труб и каналов [1]. Значительно меньшее внимание уделяется наклонным трубам и каналам, несмотря на то что угол наклона может вносить существенный вклад в характер течения газожидкостных потоков и оказывать влияние на пузырьки, всплывающие в неподвижной жидкости.

В работе [2] исследованы пузырьки жидкости с относительным сферическим диаметром в диапазоне 4,75÷9,14 мм, всплывающие вблизи наклонной поверхности (угол наклона 30°). Авторы говорят о увеличении локального коэффициента теплообмена до 8 раз в сравнении со случаем свободной конвекции (усредненное значение теплообмена увеличивается в 2 раза по сравнению со случаем без добавления газовой фазы).

Для экспериментов использовался стенд, представленный на Рис. 1. Газ подавался с помощью измерителя-регулятора расхода газа (1) через капилляр (2) с известными геометрическими параметрами в жидкость. Рабочим участком служила стеклянная труба (3) внутренним диаметром 34 мм и длиной 1,2 м. Стенд позволяет варьировать угол наклона от 0° (что соответствует вертикальному положению канала) до 90° (что соответствует горизонтальному положению), более узкий диапазон углов наклона был выбран так как в работах [3] показано, что в газожидкостном течении в плоском наклонном канале с поперечным сечением 10×100 при углах наклона канала  $\theta=30\div60^\circ$  наблюдалось значительное увеличение значений относительного трения и теплообмена на верхней стенке канала. Съемка пузырей проводилась на камеру (4) при освещении светодиодной матрицей (5).

В качестве рабочей жидкости в экспериментах использовалась дистиллированная вода, в качестве рабочего газа – воздух.

Изображения пузырьков регистрировались системой камерой Nikon Zfc через оптическую секцию. Скорость съемки составляла 120 кадров в секунду при разрешении 1920×1080 пикселей. Полученные изображения были обработаны программно аналогично методу, описанному в работе [4] Диаметр газовых пузырей вычислялся из площади пузыря на снимке как эквивалентный диаметр по формуле  $D = \sqrt{4S/\pi}$ .

Показано, что при малых расстояниях от места ввода газа до оптической секции угол наклона канала не оказывает значительного влияния на распределение диаметров и на средний диаметр газовых пузырей, основная часть пузырей имеет диаметр 1,2÷1,5 мм.

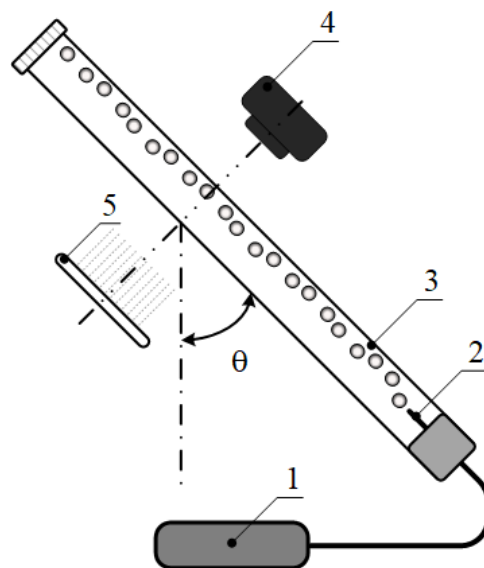


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
1 – измеритель-регулятор расхода газа, 2 – капилляр,  
3 – рабочий участок, 4 – камера,  
5 – светодиодная матрица.

При увеличении расстояния от места ввода газа до точки съемки средний диаметр газовых пузырей увеличивается до 2÷3,5 мм, при этом встречаются единичные пузыри и большего диаметра, а пузырей размерами 1,2÷1,5 мм практически нет. Наибольший эффект от угла наклона канала на средний диаметр и распределение диаметров газовых пузырей наблюдается на расстоянии 600 мм от места ввода газа до оптической секции.

### Список литературы:

1. Houston S.D.; Cornwell K. Heat transfer to sliding bubbles on a tube under evaporating and non-evaporating conditions // Int. J. Heat Mass Transfer. 1996. Vol. 39 p. 211–214.
2. Donnelly B. et al. The dynamics of sliding air bubbles and the effects on surface heat transfer // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 91. P. 532–542.
3. 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.
4. Fu Y., Liu Y. Development of a robust image processing technique for bubbly flow measurement in a narrow rectangular channel // International Journal of Multiphase Flow. 2016. Vol. 84. P. 217–228.].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-20029 при финансовой поддержке Правительства Новосибирской области, <https://rscf.ru/project/22-21-20029/>

УДК 536.24

## ТРЕХПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ ШВАРЦА КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ГЕОМЕТРИИ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Грекова А.Д., Кривошеева И.О., Лысыков А.И., Токарев М.М.

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 5

Адсорбционное преобразование тепла – это энергосберегающая технология, позволяющая делать тепло низкопотенциальных источников тепла доступным для потребителя. В основе технологии лежит обратимая реакция сорбции/десорбции паров сорбтива пористым сорбентом. При контакте сухого сорбента с парами сорбтива сорбент разогревается, а испаритель охлаждается. Данные термические эффекты (холод либо тепло) и могут быть использованы потребителем. Регенерацию сорбента проводят за счет естественных источников низкопотенциального тепла, что и обеспечивает энергосберегающий эффект. Эффективность адсорбционного преобразователя тепла (АПТ) напрямую зависит от эффективности работы адсорбера-теплообменника (АТО), в который загружен сорбент. В данный момент для создания АПТ применяют автомобильные или мотоциклетные радиаторы, изначально разработанные совсем для других процессов. Целью данного проекта является поиск оптимальных геометрий АТО для обеспечения большей эффективности АПТ. Такое исследование позволит дать рекомендации для создания более эффективных, а следовательно, и более компактных устройств интересных потребителям.

Критерием оптимального АТО можно считать максимум мощности на единицу объема сердцевины теплообменника (ТО), так как именно такие характеристики позволяют создать компактные устройства интересных потребителям. Необходимо найти геометрию, обеспечивающую:

- максимальную теплопередачу на единицу объема;
- максимальную массу адсорбента в свободном пространстве ТО.

Моделирование геометрии вторичных элементов и вычисление их текстурных характеристик проводили в программе для 3D моделирования «Cgeo Parametric». В качестве материала был выбран ABS-пластик. Внешний габарит блоков составлял  $20 \times 120 \times 7,5$  мм<sup>3</sup>, т.е. их брутто объем составлял  $V_{\Sigma} = 18$  см<sup>3</sup>. Вычисляли объем  $V_{ABS}$  пластика, необходимого для изготовления блока и площадь поверхности теплообмена  $S$ . В качестве модельных вторичных элементов рассматривали прямоугольные блоки традиционной геометрии: массивы прямоугольных пластин, трубчатый квадратный массив и сотовые гексагональные массивы. Другим типом заполнения блоков были трехпериодические минимальные поверхности Шварца, образующими связную систему полостей [1].

При сопоставлении свободного объема и поверхности рассмотренных образцов были выделены наиболее перспективные как среди простых геометрий, так и среди трехпериодических структур. Сменные вторичные элементы изготовили методом 3D печати. Испытания лучших образцов, помещенных

между плоскими металлическими каналами, проводили в лабораторной установке для измерения тепловых потоков воздушных радиаторов. Используя данную установку, определяли коэффициент теплопередачи ТО –  $UA$  Вт/К. Результаты измерения зависимости  $UA$  (вода-воздух) модельного ТО с вторичными теплопроводящими элементами различной геометрии и без таковых, в зависимости от скорости потока воды и воздуха показывают, что теплопередача ТО, состоящего только из первичных элементов невелика и составляет от 1 до 2 Вт/К (см. рис. 1).

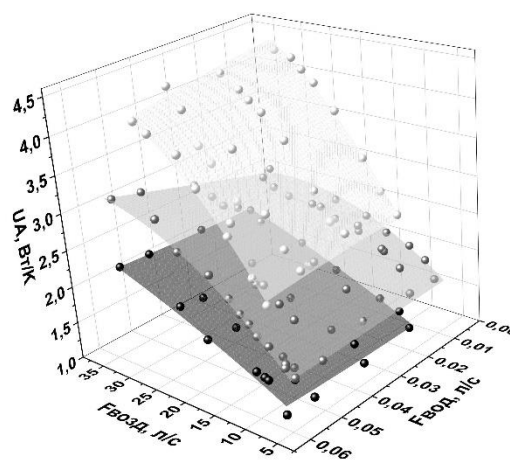


Рисунок 1.  $UA$  (Вт/К) ТО с различными вторичными элементами. Символы – экспериментальные точки: (●) – ТО без вторичных элементов, (●) – шелевидные вторичные элементы, (○) – гироид, поверхности – аппроксимация.

Добавление шелевидных элементов приводит к росту  $UA$  до 1.5-3 Вт/К. Применение в качестве вторичного элемента гироида приводит к улучшению теплопередачи ТО до  $UA=2-4$  Вт/К. Таким образом, оценить эффект изменения геометрии вторичного теплопроводящего элемента можно по росту прибавки  $UA$  по сравнению с ТО без вторичных элементов. В случае традиционных шелевидных элементов эта прибавка составляет 0.5-1 Вт/К, а в случае гироида прирост теплопередачи составляет 1-2 Вт/К. Если рассматривать ТО в целом, то изменение геометрии вторичного теплопроводящего элемента с регулярной (обычной щели) на трехпериодическую (гироид) приводит к относительному росту теплопередачи на 30-40%, в зависимости от условий эксперимента.

### Список литературы:

1. Soliman A., A Review on New 3-D Printed Materials' Geometries for Catalysis and Adsorption: Paradigms from Reforming Reactions and CO<sub>2</sub> Capture//Nanomaterials 2020. V.10. №11, 2198–2236

Работа выполнена при поддержке РФФ грант № 21-79-10183.

**КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА НИЗКОСОРТНОГО УГЛЯ****Губин В.Е., Болатова Ж., Пак А.Я., Мамонтов Г.Я.**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 30

Уголь остается одним из востребованных видов ископаемого топлива и будет оставаться в ближайшем будущем таковым. Соответственно совершенствование существующих и развитие новых технологий использования угля является важной научно-технической задачей. Повышение эффективности и экологичности процессов добычи, транспортировки и использования углеводородных топлив следует считать одной из глобальных задач современной энергетики. Важным направлением в этой области является развитие технологий термической конверсии угля, в частности, газификации. Данное направление развивается в том числе на стенде для опытно-промышленных испытаний, расположенном на Томской ТЭЦ-3. Экспериментальные результаты показывают широкие перспективы внедрения технологий газификации угля [1].

Существует проблема использования низкосортных углей ввиду их высокой зольности, низкой удельной теплотворной способности. В процессе сжигания угля в промышленных масштабах образуется огромное количество твердых отходов, таких как зола и шлак [2]. Существует несколько способов хранения и использования золошлаковых отходов. В литературе обсуждаются подходы к утилизации золошлаковых отходов в качестве вторичного сырья, например, ее применение в строительных материалах [3–5] или использование в качестве наполнителей при производстве каучука для шин [6], в производстве керамики [7]. Также считается, что утилизация золошлаковых отходов может позволить вернуть в производственный цикл некоторые металлы (молибден, кобальт и другие) в количестве, сравнимом с объемами добычи [8].

Одним из перспективных подходов к переработке золошлаковых отходов является использование плазмы для достижения температуры плавления золы или восстановления в ее составе оксидов металлов и неметаллов. Такой процесс можно осуществить генерацией электродуговой плазмы. Достижение высоких температур порядка 10000 К, высоких скоростей нагрева (до  $10^6$  К/с), в комплексе с разложением органических, биологически активных и токсичных веществ под действием ультрафиолетового и теплового излучений позволяют считать, что плазменные методы характеризуются высоким потенциалом в области переработки отходов [9].

Предложены оригинальный метод [10] и конструкция электродугового реактора для переработки золошлаковых отходов с использованием плазмы дугевого разряда постоянного тока. Серия экспериментов по переработке угольного шлака проводилась на лабораторной электродуговой установке [11–12]. Основой питания электродугового реактора является силовой источник питания с повышающим преобразователем частоты, понижающим силовым трансформатором, управляемым выпрямителем. Рабочая сила тока источника питания была установлена равной 200 А при напряжении

холостого хода 63 В. К источнику питания подключались графитовые электроды. Анод установлен над катодом с возможностью перемещения при помощи вертикального линейного электропривода с шаговым двигателем. Непосредственно над катодом устанавливается зонд газоанализатора (ТЕСТ 1, Бонэр) для оценки формирующейся газовой среды. В ходе экспериментов оценивали изменение массы электродов до и после переработки шлаковых отходов. Температура катода измерялась пирометром после окончания горения дугевого разряда. Был составлен массовый баланс, в серии экспериментов оценивался ресурс электродов дугевого реактора. Согласно полученным данным масса анода изменяется от 0,4 до 0,6 г±0,12 г, а масса катода варьируется в пределах 0,5 ± 0,12 г, данный процесс связан с электрической эрозией электродов. Часть массы электродов расходуется на образования смеси углекислого и угарного газа, которая обеспечивает самоэкранирование реакционного объема от кислорода воздуха. Остальная часть массы переходит в продукт переработки шлаковых отходов.

## Список литературы:

1. Ryzhiy I.A., Shtegman A.V., Tugov A.N., Sirotin D.A., Gutnik M.M., Fomenko E.A., Sosin D.V., Timashkov K.V., Alekseenko S.V., Zavorin A.S., Gubin V.E., Matveev A.S., Gvozdiakov D.V., Larionov K.B., Yankovsky S.A., Slyusarsky K.V. Pilot Tests of a Fixed-Bed Coal Gasifier // *Thermal Engineering*. 2021. V.68, P. 461–472.
2. Agriz C., Moragues A., Menéndez E. Use of ground coal bottom as cement constituent in concretes exposed to chloride environments // *J. Clean. Prod.* 2018. V. 170. P. 25-33.
3. Lemly A.D. Damage cost of the Dan River coal ash spill // *Environ. Pollut.* 2015. V. 197. P. 55-61.
4. Xu G., Shi X. Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: a state-of-the-art review // *Resour. Conserv. Recycl.* 2018. V. 136. P. 95-109.
5. Singh N.M.M., Arya S. Utilization of coal bottom ash in recycled concrete aggregates based self compacting concrete blended with metakaolin // *Resour. Conserv. Recycl.* 2019. V. 144. P. 240-251.
6. Ren X.J., Sancaktar E. Use of fly ash as eco-friendly filler in synthetic rubber for tie applications // *J. Clean. Prod.* 2019. V. 206. P. 374-382.
7. Hossain S.S., Roy P.K. Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review // *J. Asian Ceram. Soc.* 2020. V. 8 P. 984-1009
8. Reijnders L. Disposal, uses and treatments of combustion ashes: A review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2005. V. 43. P. 313–336.
9. Gomez E., Rani D.A., Cheeseman C.R., Deegan D., Wise M., Boccacini A.R. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review // *J. Hazard. Mater.* 2009. V. 161. P. 614-626.
10. Метод получения порошка, содержащего карбид кремния и нитрид алюминия из золы природного угля. Патент № 2731094 Российская Федерация, МПК C01B 32/963 (2017. 01), C04B 35/52 (2006. 01), C04B 35/565 (2006. 01), C04B 35/581 (2006. 01).
11. № 2020111641: заявл. 20. 03. 2020; опубл. 28. 08. 2020 / Пак А. Я., Мамонтов Г. Я., Губин В. Е., Васильева Ю. З.; заявитель ФГАОУ ВО НИ ТПУ. – 4 с. : ил. – Текст: непосредственный
12. Pak A., Ivashutenko A., Zakharova A., Vassilyeva Y. Cubic SiC nanowire synthesis by DC arc discharge under ambient air conditions // *Surf. Coat. Technol.* 2020. V. 387.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках научного проекта №FSWW-0022-2020.*



УДК 532.5:517.984

**МЕТОД ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ УРАВНЕНИЯ КДФ: БОЛЬШОЙ ВОЛНОВОЙ ПАКЕТ**

**Гудько А.С.<sup>1,2</sup>, Гелаш А.А.<sup>3,4</sup>, Мулладжанов Р.И.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

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

<sup>3</sup> Сколковский институт науки и технологий,  
143026, Россия, Москва, Московская обл., ул. Нобеля, 1

<sup>4</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1

Уравнение Кортевега–де Фриза (КдФ) является интегрируемым уравнением, которое описывает поведение волн на поверхности неглубокого слоя жидкости. Метод обратной задачи рассеяния представляет собой одно из наиболее ярких достижений математической физики XX-го века. Он позволяет по известному волновому профилю интегрируемого уравнения в некоторый момент времени определить данные рассеяния, решая прямую задачу рассеяния, которые далее во времени изменяются достаточно тривиальным образом. В свою очередь, решение интегральных уравнений обратной задачи рассеяния позволяет восстановить профиль волны в любой момент времени [1].

Теоретический анализ солитонных полей, на примере нелинейного уравнения Шредингера, показал, что численная реализация обратной задачи рассеяния сталкивается с обработкой очень больших и очень малых чисел, а алгоритм прямой задачи рассеяния с так называемыми аномальными численными ошибками. Поэтому, для устойчивой работы численных алгоритмов было предложено применять высокоточную арифметику [2,3]. Также было показано, что схемы высокого порядка позволяют эффективно бороться с экспоненциальным накоплением ошибок при увеличении числа солитонов [4].

В данной работе предлагаются новые численные подходы к решению прямой и обратной задач рассеяния уравнения КдФ для исследования нелинейных волновых полей с большим числом солитонов. За основу алгоритмов мы взяли метод Боффета–Осборна для решения прямой задачи рассеяния, разработав схемы высокого порядка сходимости [5] и применив высокоточную арифметику, и метод одевания для решения обратной задачи рассеяния. Мы показываем влияние порядка численной схемы на абсолютную ошибку вычисления собственных чисел  $\lambda^{num}$  и относительную ошибку нормировочных констант  $\rho^{num}$  от количества точек дискретизации  $M$ , также мы демонстрируем влияние численной ошибки в зависимости от количества солитонов  $N$ , при фиксированном значении дискретизации. Рис. 1 и Рис. 2 демонстрируют устойчивое решение прямой и обратной задачи рассеяния для различных значений  $N$ .

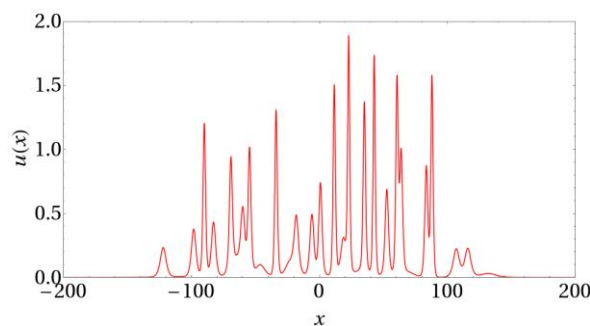


Рис. 1. Пример рассчитанного 32-солитонного поля.

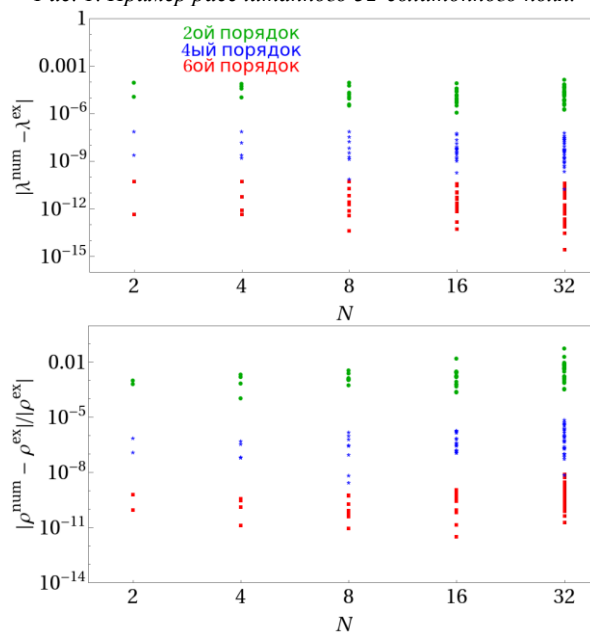


Рис. 2. Влияние порядка схемы на числовые ошибки в зависимости от числа солитонов  $N$ .

**Список литературы:**

1. Захаров В.Е., Манакон С.В., Новиков С.П., Питаевский Л.П. Теория солитонов: Метод обратной задачи. Наука, 1980.
2. A.A. Gelash, and D.S. Agafontsev, Strongly interacting soliton gas and formation of rogue waves // Physical Review E. – 2018, – Т. 98, С. 042210.
3. Gelash A., Mullyadzhano R. Anomalous errors of direct scattering transform //Physical Review E. – 2020. – Т. 101. – №. 5. – С. 052206.
4. Mullyadzhano R., Gelash A. Direct scattering transform of large wave packets // Optics Letters. – 2019. – Т. 44. – №. 21. – С. 5298-5301.
5. Gudko A., Gelash A., Mullyadzhano R. High-order numerical method for scattering data of the Korteweg—De Vries equation // Journal of Physics: Conference Series 1677 (1), 012011, 2020.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.*

УДК 532.62:532.59

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕХОДА К ТРЁХМЕРНОМУ ВОЛНОВОМУ ДВИЖЕНИЮ ПРИ НАКЛОННОМ ТЕЧЕНИИ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ****Гузанов В.В., Бобылев А.В., Квон А.З.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Переход от двумерного к трехмерному волновому движению на поверхности стекающих пленок жидкости в широком диапазоне чисел Рейнольдса сопровождается формированием продольных струй [1]. Экспериментальному исследованию таких течений в случае жидкостей с различными физическими свойствами посвящено небольшое количество работ (см., например, [1, 2]), которые к тому же ограничены только случаем вертикального течения плёнки.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования волнового пленочного течения по наклонной пластине для жидкостей различными физическими свойствами в диапазоне чисел Рейнольдса пленочного течения  $10 \leq Re = q/\nu \leq 40$ , где  $q$  – удельный расход жидкости,  $\nu$  – кинематическая вязкость.

Эксперименты проводились на установке, описанной в [1]. Рабочий участок представлял собой закрепленную стеклянную пластину длиной 140 см и шириной 50 см, при этом пластина отклонялась от вертикального положения в диапазоне углов  $0 < \alpha < 30^\circ$ . Плёнка жидкости формировалась на верхней поверхности пластины при помощи щелевого распределителя и под действием силы тяжести стекала вниз. В качестве рабочих жидкостей использовались вода, водоглицериновый раствор (ВГР) и водоглицериновый раствор с добавлением бутанола. Число Капицы указанных рабочих жидкостей, рассчитанное для вертикального случая, составляло, соответственно, 3760, 1770 и 740. Здесь число Капицы,  $Ka = (\sigma^3/g\nu^4\rho^3)^{1/3}$ , где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости,  $\rho$  – плотность,  $g$  – ускорение свободного падения. Добавление бутанола позволяет понизить поверхностное натяжение раствора и, расширить диапазон чисел Капицы, а также избежать эффектов динамического изменения поверхностного натяжения, свойственных растворам с ПАВ. Для возбуждения двумерных волн на расход жидкости перед входом на рабочий участок накладывались гармонические возмущения с частотой  $8 \leq F \leq 18$  Гц.

Мгновенная картина течения регистрировалась с разрешением 0,18 мм/пиксель на всём рабочем участке при помощи модернизированного метода теневой визуализации (более подробное описание см. в [1]), который позволяет наблюдать участки течения с различной кривизной поверхности одновременно на одном изображении. Для этого расстояние от плоскости течения до экрана, на котором формировалась светотеневая картина, устанавливалось для разных условий течения от 4 до 7 см.

Обнаружено, что, как и для случая вертикального течения, при всех исследованных углах наклона переход от двумерного к трёхмерному волновому движе-

нию на поверхности плёнки сопровождается формированием струй (рис. 1 а)). При этом с увеличением отклонения от вертикали область перехода смещается дальше вниз по потоку (рис. 1 б) и в)).

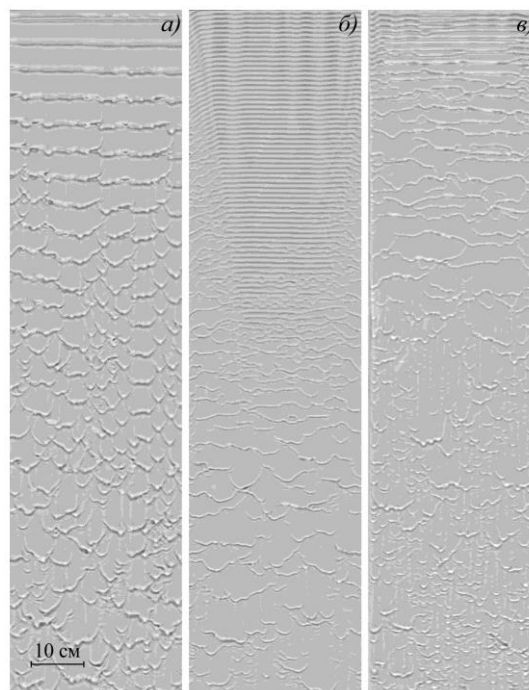


Рис. 1. Теневые картины течения. а) ВГР,  $\alpha=30^\circ$ ,  $Re=20$ ,  $F=8$  Гц; б) вода,  $\alpha=30^\circ$ ,  $Re=11$ ,  $F=18$  Гц; в) вода,  $\alpha=0^\circ$ ,  $Re=11$ ,  $F=18$  Гц.

С увеличением отклонения от вертикали возрастает возмущающее влияние берега на течение. Для некоторых режимов течения это приводит к тому, что неустойчивость, ведущая к разрушению двумерных волн, проявляется возле берегов течения и постепенно распространяется к центру течения (рис. 1 б)). Тогда как для вертикального течения характерна картина, когда неустойчивость проявляется одновременно по всей ширине течения (рис. 1 в)).

Отметим, что такое влияние берега на течение характерно только для наклонных течений, и не наблюдается при вертикальном течении плёнок жидкостей в широком диапазоне значений числа Капицы.

## Список литературы:

1. Guzanov V. V. et al. Characterization of 3-D wave flow regimes on falling liquid films// International Journal of Multiphase Flow. 2018. V. 99. С. 474–84.
2. Kharlamov S.M. et al. The transition from two-dimensional to three-dimensional waves in falling liquid films: Wave patterns and transverse redistribution of local flow rates// Phys. Fluids. 2015. V. 27. №. 11. P. 114106.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 532.72

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА БАРОДИФФУЗИИ НА ДИНАМИКУ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В МАГМАТИЧЕСКОМ РАСПЛАВЕ

Давыдов М.Н.<sup>1,2</sup>, Чернов А.А.<sup>1,3</sup>, Пильник А.А.<sup>1,3</sup>, Лежнин С.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет

<sup>2</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

<sup>3</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

davydov@hydro.nsc.ru

Работа посвящена численному моделированию динамики газового пузырька в магматическом расплаве при его декомпрессии с конечной скоростью. Сформулированная в работе модель, в отличие от предыдущих моделей авторов [1, 2], учитывает эффект бародиффузии, который при определенных условиях может играть существенную роль из-за возникающего в расплаве вокруг пузырька в процессе его роста большого градиента давления. Это обусловлено экспоненциально сильной зависимостью вязкости магматического расплава от концентрации растворенных в нем летучих компонент. Данный эффект отражается в уравнении материального баланса в виде слагаемого с градиентом давления на границе пузырька:

$$\frac{dm_g}{dt} = 4\pi R^2 \rho_l \left\{ \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=R} + k_p \left( \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{r=R} \right\},$$

где  $k_p = D_p/D$  — бародиффузионное отношение ( $D_p$  — коэффициент бародиффузии, имеющий ту же размерность, что и коэффициент диффузии  $D$ ).

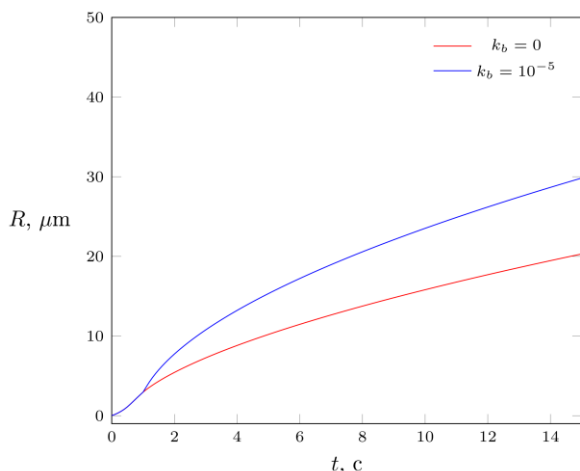


Рис.1. Зависимость радиуса пузырька от времени.

На рис. 1 представлена расчетная зависимость радиуса пузырька от времени. Хорошо видна переходная стадия роста, характеризующаяся динамическими эффектами. На этой стадии зависимости, рассчитанные как с учетом ( $k_p = 10^{-5}$ ), так и без учета ( $k_p = 0$ ) бародиффузионного эффекта, практически совпадают. В дальнейшем, по мере формирования вокруг пузырька диффузионного пограничного слоя и, как следствие, значительного градиента давления, зависимости начинают видимо отличаться, так как второй член в уравнении материального баланса начинает играть существенную роль. Динамика давления в среде при этом при наличии бародиффузионного эффекта и без него качественно совпадает. Однако, при наличии ба-

родиффузии пузырек растет быстрее. И в том, и в другом случае по прошествии определенного времени процесс начинает носить автомодельный характер, определяется исключительно диффузией, а зависимость радиуса пузырька от времени становится корневой (моделирование проводилось до времен  $\sim 10^3$  с).

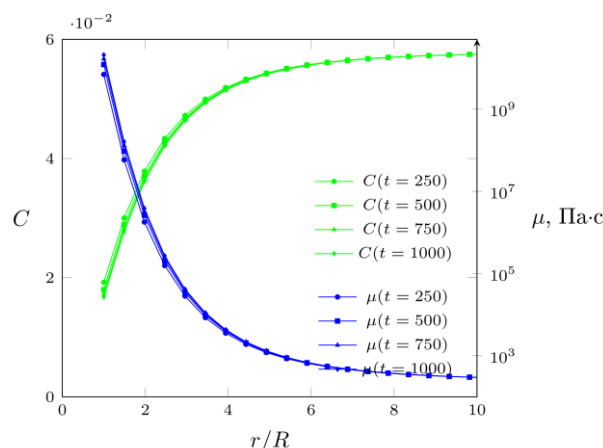


Рис. 2. Зависимости концентрации газа и вязкости расплава вокруг пузырька от радиальной координаты.

Рис. 2 иллюстрирует зависимость концентрации газовой фазы и вязкости среды вокруг пузырька от безразмерной радиальной координаты в различные моменты времени (расчеты проводились с учетом бародиффузионного эффекта). Давление в среде в расчетах сбрасывалось со 180 МПа до атмосферного за 1с. Видно, что кривые на графике практически совпадают друг с другом, что подтверждает автомодельный характер исследуемого процесса. Отдельно следует отметить наличие значительного градиента вязкости на границе пузырька, что еще раз подчеркивает необходимость учета бародиффузионного эффекта.

Проведенные численные исследования на основе построенной модели позволили определить диапазон значений коэффициента бародиффузии, при котором появляется заметное отличие в динамике пузырька. Таким образом, показано, в каких случаях бародиффузионный эффект может оказать существенное влияние на весь процесс фазового превращения.

### Список литературы:

1. Chernov A.A., Kedrinsky V.K., Pil'nik A.A. Kinetics of gas bubble nucleation and growth in magmatic melt at its rapid decompression // *Physics of Fluids*. 2014. V. 26, № 11. P. 116602.
2. Chernov A.A., Pil'nik A.A., Davydov M.N., Ermanyuk E.V., Pakhomov M.A. Gas nucleus growth in high-viscosity liquid under strongly non-equilibrium conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 123. P. 1101-1108.

Работа поддержана РФФ (грант № 22-19-00092).

УДК 621.1.016.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ЗАДАЧАХ КИПЕНИЯ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ, МИНИКАНАЛАХ, СПРЕЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Дедов А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

В современной технике необходимы простые и надежные решения, обеспечивающие стационарный теплоотвод и термостабилизацию устройств при плотности теплового потока, до десяти раз превышающих критическую плотность теплового потока (КТП) при кипении в большом объеме для выбранной жидкости. Для воды требуемый уровень плотности теплового потока при термостабилизации элементов термоядерных установок, обеспечивающих ввод жидкого лития в плазму составляет 10–40 МВт/м<sup>2</sup> (в сочетании с требованием термостабилизации на уровне 300 С). Для диэлектрических жидкостей и хладонов, используемых в качестве охладителя элементов микроэлектронной техники, уровень достигает 2–5 МВт/м<sup>2</sup>. Обеспечить термостабилизацию при необходимых плотностях теплового потока возможно с использованием фазовых переходов охлаждающей жидкости и дополнительной интенсификации теплообмена. Данная задача остается является одной из самой исследуемой теплофизическим сообществом уже более 10 лет, и по-прежнему актуальной и нерешенной. Известны лабораторные опыты по кипению в большом объеме, в которых достигнуты необходимые плотности тепловых потоков на поверхностях размером 1 см<sup>2</sup> при различной модификации теплообменной поверхности. Достигнутые результаты в задачах охлаждения сведены на график рис. 1 [1].

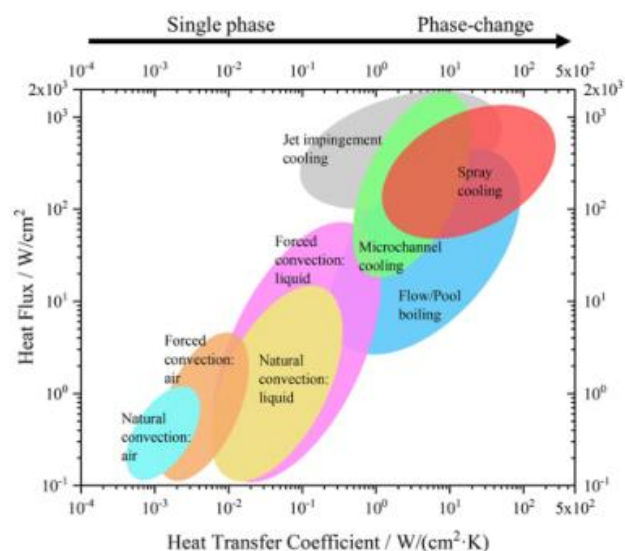


Рис.1. Сравнение эффективности методов охлаждения [1]

Данные (рис. 1) представлены исследователями струйного охлаждения, вызывают вопросы по достигнутым значениям и содержат серьезное упущение – отсутствуют результаты по кипению в недогретом потоке. «Мировой рекорд» по достижению КТП получен

при кипении в сильно недогретом потоке воды в трубке диаметром 0,6 мм при скорости потока более 100 м/с, и вряд ли будет побит в силу бессмысленности подобных параметров в реальных устройствах. Но кипение в потоке недогретой жидкости – наиболее действенный способ достижения максимальных КТП. Тем не менее, рис. 1 дает верное представление о наиболее действенных способах: кипение в большом объеме/в потоке, спрейной охлаждение, использование микроканалов.

На кафедре ОФиЯС НИУ «МЭИ» выполнены систематизированные опытные исследования теплообмена при фазовых переходах с использованием охлаждения диспергированным потоком вертикальных плоских мишеней и каналов, интенсификации теплообмена при кипении и КТП в большом объеме на структурированных поверхностях и в потоке хладонов в миниканале с модифицированной поверхностью. В докладе представлены результаты исследований.

Для условий охлаждения диспергированным потоком воды использованы жидкостные форсунки и форсунки с несущей газовой фазой (водо-воздушные). Достигнуты плотности тепловых потоков 2,3 МВт/м<sup>2</sup> и 6,9 МВт/м<sup>2</sup> соответственно при эффективности более 50% и малых расходах воды.

Кипение в большом объеме насыщенной жидкости на структурированных поверхностях исследовано для фреонов R113, RC318, диэлектрической жидкости HFE 7100. Исследования выполнены в диапазоне давлений (0,1–1,0) МПа, для HFE 7100 достигнуты КТП 276 кВт/м<sup>2</sup>.

Исследование теплообмена при кипении в миниканале диаметром 1,1 мм с модифицированной поверхностью выполнено в потоке фреона R125 при приведенных давлениях до 0,6 от критического в диапазоне массовых скоростей 200–2000 кг/м<sup>2</sup>с. Получены данные об интенсификации теплообмена и КТП.

Представлены использованные экспериментальные установки и методики измерений, методы расчета теплообмена и КТП, в том числе на структурированных поверхностях. Выполнено сопоставление с данными других исследователей, сделаны выводы о достижимых значениях КТП.

### Список литературы:

1. Cheng, W. L., Zhang, W. W., Chen, H., and Hu, L., 2016, "Spray Cooling and Flash Evaporation Cooling: The Current Development and Application," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 55, pp. 614–628.

Часть работы выполнена в рамках государственного задания № FSWF-2020-0023.

УДК 620.9

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЛАКОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ С ЧЕТЫРЕХВИХРЕВОЙ СХЕМОЙ СЖИГАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Дектерев А.А.<sup>1,2</sup>, Кузнецов В.А.<sup>1,2</sup>, Тэпфер Е.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск  
dekterev@mail.ru

Существующие аэродинамические схемы низкотемпературного сжигания бурых углей приводят к интенсивному зашлаковыванию поверхностей нагрева, что снижает эффективность работы котла в целом. Для поддержания рабочих режимов станции требуются значительные ресурсы на содержание автоматических систем очистки и расшлаковочные мероприятия. В СибВТИ в 90-е годы [1] была предложена четырехвихревая схема организации движения топочных газов, при которой на боковых поверхностях в несколько ярусов вблизи центра стены расположены пары горелочных устройств, потоки от которых сливаются в центре топки и образуют четыре симметричных вихревых структуры. При этом ядро горения располагается в центре топочной камеры. Для экранирования наброса факела на фронтальную и тыльную стены в их центре располагаются сопла воздушных завес, одновременно играющие роль окислительной ступени. Четырехвихревая схема была реализована при реконструкции на котлах Красноярской ТЭЦ-1 и Гусиноозерской ГРЭС и за длительное время эксплуатации при сжигании широкой гаммы углей показала хорошие результаты по тепловой эффективности и по надежности работы оборудования.

Работа посвящена моделированию особенностей структуры потоков и теплообмену в четырехвихревой топочной камере, анализу движения и выгорания частиц угольного топлива и их взаимодействию с топочными поверхностями.

Математическая модель процессов в топке при горении угольной пыли включает в себя комплекс подмоделей – турбулентной аэродинамики; движения, теплообмена и горения угольной пыли; конвективного и радиационного теплообмена, образования NOx. Для описания взаимосвязанных физико-математических процессов, происходящих в топочной камере при сжигании пылеугольного топлива, использовалась комплексная модель, реализованная в программном комплексе ANSYS Fluent и проверенная при расчете различных топочных устройств.

Для исследования сепарации угольных частиц на настенные экраны топочной камеры и в шлаковый комод была реализована математическая модель шлакования. В предложенной модели предполагается, что после выхода летучих компонент и окисления углеродного остатка в угольной частице остаётся минеральная твердая часть (зола), которая может прилипнуть к стенке. Интенсивность прилипания золы зависит от множества факторов: минерального состава, температура плавления золы, температура стенки и частицы, скорость удара частицы, реология расплавленной золы, количество оставшегося углерода и т.д.

Для описания процессов прилипания зольного остатка угольной частицы в работе использовалась модель Кунке [2,3]. Модель учитывает соответствующие взаимодействия частиц со стеной, классифицируя их по четырем режимам: отскок; прилипание; отскок с дроблением (термическое разрушение); отскок с дроблением и прилипанием. Два последних режима приводят к образованию пристенной шлаковой пленки. При моделировании характеристик отложения шлака, предполагается, что толщина шлака очень мала по сравнению с размером частиц в газовом потоке, следовательно, нет необходимости адаптировать расчетную сетку к поверхности.

Проведено численное моделирование топочных процессов в четырехвихревой топочной камере при сжигании различных бурых углей.

Показано, что четырехвихревая схема сжигания обеспечивает равномерное температурное поле в топке, низкую интенсивность шлакования поверхностей нагрева, допустимый уровень выбросов NOx.

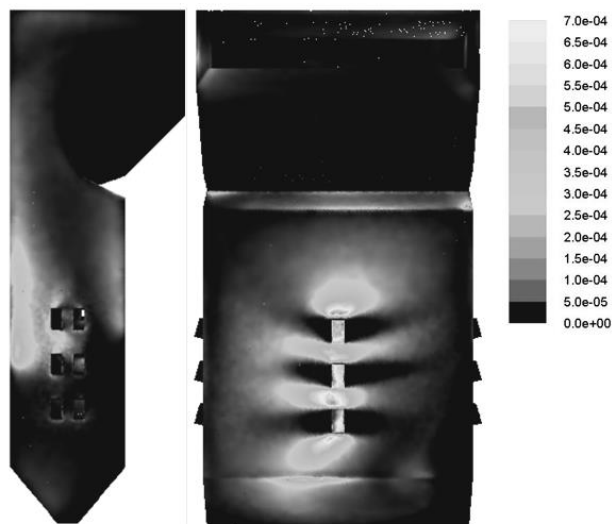


Рис. 1. Результаты расчета. Толщина шлакового слоя.

### Список литературы:

1. Срывков С.В., Процайло .М.Я, Пронини М.С., Дектерев А.А., Ковалевский А.М. Призматическая экранированная топка. Патент N 2032853, 10.04.95.
2. Kuhnke. "Spray Wall Interaction Modelling by Dimensionless Data Analysis". PhD thesis. Fachbereich Mathematik, Technischen Universität Darmstadt. 2004.
3. Bhuiyan, A. A., & Naser, J. (2016). Modelling of slag deposition and flow characteristics of coal combustion under oxy-firing condition in a 550 MW tangentially fired furnace. Applied Thermal Engineering, 106, 221–235.

Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00443).

УДК 533.6.071

**ПИКСЕЛЬНАЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА****Дектерев Ар.А.<sup>1,2</sup>, Дектерев А.А.<sup>1,2</sup>, Дектерев Д.А.<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет,  
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

В последнее время, в связи со значительным скачком в развитии электроники, алгоритмов автоматизации управления, системах аккумуляирования электропитания и совершенствования электродвигательных систем, произошёл прорыв в области производства малых беспилотных летательных аппаратов с вертикальным взлетом и посадкой (дронов) в основном квадраты и мультикоптерных схем, нашедших широкое применение в качестве аппаратов для фото и видео фиксации, в сельскохозяйственных целях и для других задач. Параллельно вырос интерес к разработке городского пассажирского и грузового аэротранспорта (аэроциклы, аэротакси, грузовые дроны и т.д.), в том числе на альтернативных и комбинированных летных схемах.

Одними из наиболее сложных задач при разработке подобных летательных аппаратов являются: исследование аэродинамики полета (в частности переход от вертикального к горизонтальному движению, скоростной полет и взаимодействие с набегающими потоками ветра) и отработка алгоритмов ручного и автоматического пилотирования. Проведение испытаний в «полевых» условиях затруднительны по многим факторам, поэтому необходимы испытания в аэродинамических трубах. Испытания даже небольших аппаратов в условиях полета требуют аэродинамических труб с рабочими участками большого сечения. В качестве альтернативы классическим аэродинамическим трубам в последнее время на западе широко развиваются так называемые пиксельные аэродинамические трубы [1]. Они состоят из массива небольших, но мощных серверных вентиляторов охлаждения. Такие системы позволяют получать поток достаточно больших скоростей на большой площади. При этом специальные алгоритмы за счет управления скорости отдельных вентиляторов позволяют варьировать профиль скорости, генерируемый системой как в пространстве, так и во времени. Недостатком таких систем является достаточно высокая цена.

В данной работе на основе численных и экспериментальных методов рассмотрена возможность создания пиксельной аэродинамической трубы с использованием промышленных осевых вентиляторов.

Экспериментально с помощью анемометрии определены характеристики выходного потока вентилятора ВО-6-300 №4 0,75кВт/3000 об/мин (рис. 1а), которые в дальнейшем использовались для верификации математической модели одиночного вентилятора.

Моделирование производилось в пакете Ansys Fluent с применением модели турбулентности k- $\omega$  SST. На первом этапе с использованием метода скользящих сеток моделировался одиночный вентилятор с полным разрешением лопастной системы (рис. 1б). Компоненты скорости и турбулентные характеристики, полученные в результате расчета, сохранялись в выходном сечении вентилятора. На втором этапе эти

данные использовались для формирования граничных условий для расчета массива вентиляторов.

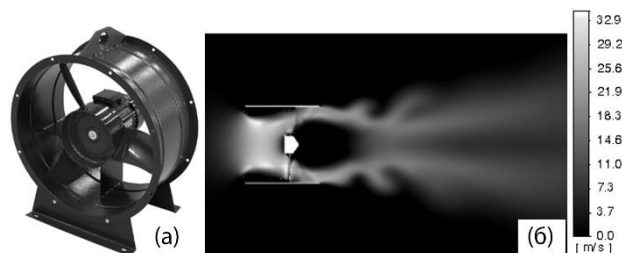


Рис. 1. Осевой вентилятор ВО-6-300 (а) и расчетное поле скорости (б).

Для большинства аэродинамических исследований необходимо, чтобы поток, создаваемый трубой, был прямолинейным и равномерным. На выходе из одиночного вентилятора формируется закрученный поток, однако, при сборке панели происходит взаимное «раскручивание» соседствующих струй. Закрутка потока остается только на периферии, как это видно на рис. 2а на примере массива размером 4x4 вентилятора. При увеличении количества вентиляторов, относительная площадь периферийного потока уменьшается. При формировании массива размером 3x3 вентилятора, периферийный поток смыкается с сонаправленно вращающимся потоком центрального вентилятора, придавая всему потоку постоянную закрутку. Таким образом, целесообразно изготовление панелей размерами 4x4 вентилятора и больше.

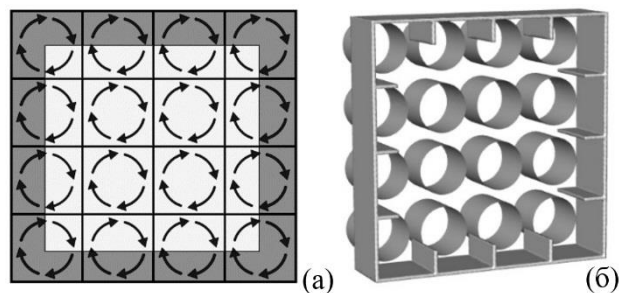


Рис. 2. Схема массива 4x4 вентилятора.

Для борьбы с периферийной закруткой предложена установка стабилизирующих ребер по периметру на выходе рис. 2б. Числено подтверждена целесообразность их установки.

Отмечается возможность управления профилем выходного потока за счет применения частотных преобразователей для регулирования скорости работы вентиляторов.

## Список литературы:

1. Noca F. et al. Wind and weather facility for testing free-flying drones // AIAA Aviation 2019 Forum. – 2019. – С. 2861.

УДК 608

**МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ РОТОРОВ****Дектерев Д.А.<sup>1,2</sup>, Дектерев Ар.А.<sup>1,2</sup>, Дектерев А.А.<sup>1,2</sup>, Лобасов А.С.<sup>1,2</sup>, Платонов Д.В.<sup>1,2</sup>,  
Необъявляющий П.А.<sup>1</sup>, Вавилов Д.В.<sup>2</sup>, Сентябов А.В.<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет,  
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

В 1909 году российский инженер Е.П. Сверчков предложил нетрадиционную схему летательного аппарата (ЛА). Подъемная сила и направленная тяга создавались гребными колесами, состоявшими из 12 лопастей, меняющих установочный угол при помощи эксцентриков и пружин. К сожалению, первые летные испытания аппарата оказались неуспешными. Тем не менее, эти работы положили начало многолетним исследованиям и попыткам создания ЛА (цикложира) на принципе циклоидального ротора [1].

Первые цикложиры, способные поднять себя в воздух появились лишь во втором десятилетии XXI века. Это стало возможным в связи с достижением требуемых параметров силовых установок и развития систем автоматического управления, необходимых для управления сложной механической схемой ротора.

Циклоидальные роторы имеют меньшие эффективности и более сложную реализацию механизма управления по сравнению с традиционными схемами (вертолетные, мультикоптерные и самолетные), тем не менее, имеют ряд важных преимуществ, позволяющих занять определенное место в иерархии ЛА. К преимуществам циклоидальных роторов в первую очередь относится возможность быстрого изменения силы тяги, и её направления в диапазоне 360°. Это даёт возможность создания ЛА с вертикальными взлетом и посадкой, высокой маневренностью, возможностью причаливания к наклонным и вертикальным поверхностям. Кроме того, в отличие от вертолетного или самолетного винта, эффективность работы лопасти ротора одинакова по всей её длине.

Главными параметрами ротора являются максимальная тяга и эффективность (отношение силы тяги к затрачиваемой мощности). Модуль тяги регулируется смещением эксцентриситета четырехзвенного механизма, задающего отклонения лопастей ротора от нормали (угол атаки), фазовое смещение эксцентрика в полярной системе координат приводит к изменению направления тяги (фазовый угол).

Первой сложностью изучения характеристик ротора является необходимость определения всех трёх компонент силы тяги и возникающие моменты. Для этого в ходе данной работы были разработаны специализированные весы на основе платформы Стюарта. Шесть тензометрических датчиков, установленных в разрыв стоек платформы обеспечивают определение трех компонент сил и моментов, действующих на поверхность платформы. На базе ПО LabView и модулей АЦП National Instruments разработана система сбора, фильтрации и обработки данных с тензодатчиков.

Исследования тягово-энергетических характеристик выявили необходимость измерения и контроля

ряда параметров ротора. Одним из таких параметров является корректность установки лопастей, как при изменении значений угла атаки, так и при изменении фазового угла – для этого разработан специализированный электронный угломер, позволяющий в любой угловой позиции лопасти измерить угол установки относительно нулевого положения.

Более сложной задачей является определение углов установки в динамике. За счет большой центробежной силы, действующей на лопасти, механизмы установки лопастей могут не справляться с удержанием заданных параметров. Контроль производился при помощи скоростной фотофиксации положения торцевой части движущейся лопасти относительно её стационарного положения. Применялся метод «фазовой заморозки» исследуемой лопасти при синхронизации по внешнему сигналу. Подобным методом измерялся и уровень изгиба лопастей, влияющий на относительные углы атаки лопасти по длине, здесь производилась фотофиксация лицевой стороны лопасти.

Скорость вращения ротора – важный параметр при резких изменениях угла установки лопастей, за счет чего изменяется момент на валу двигателя. За удержание скорости отвечают параметры ПИД-регулятора системы автоматического управления. Вибрационные характеристики ротора исследованы на основе оптических систем и гироскоп/акселерометра.

В ходе работы изучалась локальная аэродинамика на кромках торцевых дисков различного типа, отвечающая за эффективную длину лопасти. Применялась фото- и видеофиксация задымленного потока. Для измерения профиля выходного потока, кардинально зависящего от типа реализации торцевых стенок ротора, производилась автоматизированная анемометрия на координатном устройстве, а также визуализация задымленного потока с засветкой лазерным ножом.

Эффективности работы силовой установки (двигатель, регулятор двигателя, аккумуляторные батареи) и ременно-передаточных механизмов были исследованы при помощи электронных измерителей тока, напряжения и момента на валу двигателя.

Комплексное исследование интегральных и локальных параметров, в сопровождении численного моделирования позволили добиться оптимальных параметров разрабатываемой модели ротора.

**Список литературы:**

1. Boirum C., Post S. Review of historic and modern cyclogyro design. 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. – 2009. – С. 5023

*Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (121031800229-1).*

УДК 536.24

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ДВУХФАЗНОМ ТЕЧЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ И ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ В ПЛОСКОМ МИКРОКАНАЛЕ**Дементьев Ю.А.<sup>1,2</sup>, Роньшин Ф.В.<sup>1,2</sup>, Чиннов Е.А.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Одной из сложнейших проблем теплофизики в наши дни становится проблема охлаждения микроэлектронного оборудования. 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 характерным расстоянием между ними 50–100 мкм. Электронная промышленность уже сегодня готова производить компоненты, в которых средняя плотность теплового потока может достигать величины 1 кВт/см<sup>2</sup> и выше [1]. Для охлаждения таких объектов микроэлектроники отвод тепла должен осуществляться непосредственно из зон его выделения, то есть посредством каналов размером порядка 30–50 мкм. Решение этой задачи сопряжено с рядом проблем. В частности, с уменьшением размеров каналов происходит рост перепада давления. 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].

Данная работа посвящена исследованию теплообмена при двухфазном течении диэлектрической жидкости FC-72 и парогазовой смеси в плоских микроканалах высотой 50 и 35 мкм и шириной 10 мм.

Стенд представлял собой рабочий участок с микроканалом и системой измерительного оборудования, включающую инфракрасный сканер FLIR® Titanium HD 570M, позволяющий измерять среднюю температуру на микроканальном пленочном нагревателе размером 10x10 мм<sup>2</sup>, термопары на вводе и выводе из микроканала, резьбовые датчики давления BD Sensors® DMP 331, вкрученные в подводные газожидкостные интерфейсы, а также контроллеры National Instruments® DAQ-mx USB-6001 и National Instruments® 9214, присоединенных к компьютеру. Инжекция газа в канал осуществлялась из баллона при помощи регулятора расхода Bronkhorst® EL-FLOW F-211CV, управляемого контроллером, а инжекция жидкости осуществлялась с помощью шестеренчатого насоса Cole-Parmer®. Кроме того, использовалась шпирен-система визуализации потока, состоящая из источника света Olympus® KL 2500 LED, фокусирующей линзы, 50/50 светоделительной пластины и высокоскоростной камеры Phantom® VEO 410 с объективом Nikon® AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED. Рабочий участок состоял из инжекционного корпуса, напечатанного на 3D принтере ANYCUBIC® Photon с использованием фотополимерной печати акриловой смолой и двух стеклянных пластин плотно

прижатых друг к другу. Первая пластина – сапфир с напыленным пленочным нагревателем из оксида индий-олова (ИТО), вторая – боросиликатное оптическое стекло Borofloat® 33 и вытравленным с помощью фотолитографии вдоль всей длины микроканалом. Зазор между пластинами герметизировался клеем SM Chemie® 301+. В качестве рабочей жидкости использовалась диэлектрическая фторуглеродная жидкость FC-72, в качестве рабочего газа – азот.

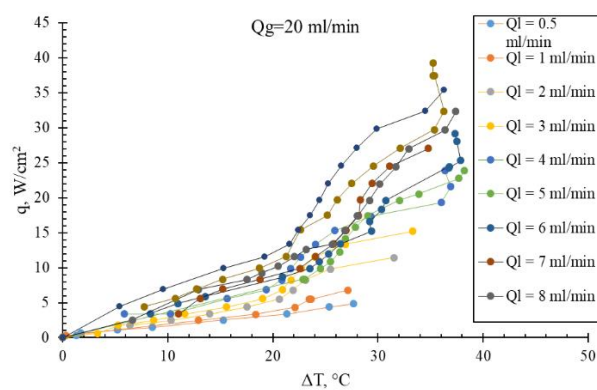


Рис. 1. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при фиксированном расходе газа

На рис. 1 показана зависимость плотности теплового потока от температурного напора при различных расходах жидкости. Можно наблюдать, что при увеличении расхода жидкости критический тепловой поток возрастает. Резкий рост теплового потока соответствует интенсификации теплообмена при испарении. Режимы течения при этом менялись. В начале кипения наблюдался классический пузырьковый режим. С увеличением теплового потока число центров парообразования увеличивалось, парогазовые пузыри сливались, образуя вспененный режим. При дальнейшем увеличении теплового потока наблюдался кольцевой режим, когда парогазовое ядро двигалось в центре канала, а по периметру двигалась испаряющаяся пленка жидкости. Ухудшение теплоотдачи наблюдается при частичном или полном высыхании пленки жидкости.

## Список литературы:

1. M.H. Nasr, C.E. Green, P.A. Kottke, X. Zhang, T.E. Sarvey, Y.K. Joshi, M.S. Bakir, A.G. Fedorov, Flow regimes and convective heat transfer of refrigerant flow boiling in ultra-small clearance microgaps // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. V. 108. PP. 1702-1713.
2. Plawsky, J. L., Fedorov, A. G., Garimella, S. V., Ma, H. B., Maroo, S. C., Chen, L., & Nam, Y. (2014). Nano-and microstructures for thin-film evaporation—a review. // Nanoscale and microscale thermophysical engineering, V. 18. N.3. PP. 251-269.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 22-19-20090).



УДК 621.9

## РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРА В ТРУБНЫХ ПУЧКАХ КОНДЕНСАТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Демидов А.Л., Рябчиков А.Ю.

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, 620002, ул. Мира, 17

По результатам испытаний конденсационной установки К-6000-ХП паровой турбины Кт-63-7,7 АО УТЗ блока ПГУ-230 установлено хорошее согласование экспериментальных данных с нормативными характеристиками конденсатора и расчетом по методике завода-изготовителя турбины [1]. Испытания показали также наличие неравномерного распределения удельных паровых нагрузок между основными (ОП) и встроенным (ВП) пучками.

Особенностью ТЭЦ, на которой установлен энергоблок ПГУ-230, является наличие вентиляторной градирни, которая позволяет регулировать температуру циркуляционной воды, подаваемой в конденсатор, в диапазоне 15–35°C. При испытаниях расход воды в конденсатор соответствовал всему диапазону изменения расхода воды и составлял: в основные пучки 6000–10 500 т/ч, во встроенный пучок 750–1250 т/ч. Расход пара в конденсатор изменялся теплофикационной диафрагмой от 30 до 100 т/ч (номинальный расход составляет 300 т/ч).

Для обработки опытных данных и сопоставления их с нормативными характеристиками использовали методики расчета завода – изготовителя турбины АО УТЗ. Коэффициент теплопередачи ОП рассчитывали по методике Всероссийского теплотехнического института, а ВП – по методике “Метро-Виккерс” с поправками [2].

Расход пара в конденсатор вычисляли по уравнению теплового баланса конденсатора и материальному балансу турбины.

Разность энтальпий пара и конденсата зависит от степени сухости пара  $x$

$$\Delta h = h_{п} x + h_{к} (1-x),$$

где  $h_{п}$ ,  $h_{к}$  – энтальпия пара и конденсата в состоянии насыщения.

В [3] рекомендуется рассчитывать  $x$  по экспериментальной формуле

$$x = \frac{p_{к} + 13.8}{p_{к} + 16.0} 1.025,$$

где  $p_{к}$  – давление пара в конденсаторе, кПа.

Для сопоставления с экспериментальными данными уточнена методика расчета давления в конденсаторе с определением давления пара в отдельных трубных пучках. Заводская методика расчета характеристик конденсатора основана на определении коэффициента теплопередачи конденсатора при подаче циркуляционной воды в основные и встроенный пучки. При подаче во встроенный пучок обратной сетевой или подпиточной воды, а в основные – циркуляционной воды коэффициенты теплопередачи вычисляются отдельно для встроенного и основных пучков, причем расходы пара в пучки распределяют с условием получения одинаковых давлений пара в пучках.

На первом шаге в уточненной методике давление пара в ОП и ВП определяют при расходах пара, которые приняты пропорциональными площади поверхности теплообмена пучков. Затем расходы пара перераспределяют между пучками для выравнивания в них давления.

На рис. 1 приведены расходы пара в основные и встроенный пучки экспериментальные и рассчитанные по уточненной методике в 17 опытах. Диапазоны изменения параметров теплоносителей в отдельных опытах приведены ранее. Как видно из рис. 1 расхождения между экспериментальными и расчетными расходами пара на основные пучки не превышают 2%, на встроенный пучок 12%.

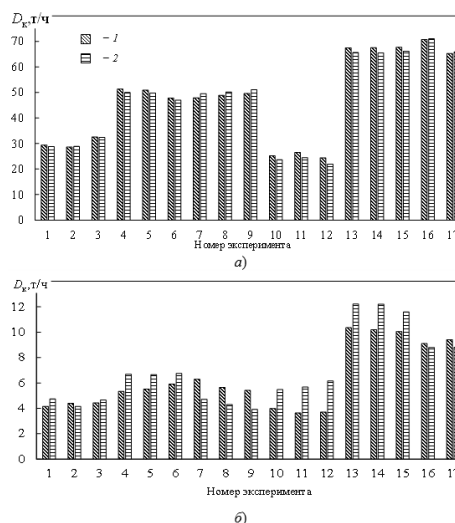


Рис. 1. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для расходов пара в трубные пучки конденсатора; а – основные пучки, б – встроенный пучок.

1 – эксперимент; 2 – расчет. Экспериментальный (1) и рассчитанный по уточненной методике (2) расход пара на основные (а) и встроенный (б) пучки.

С учетом того, что расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными, дальнейший анализ проводили по уточненной методике. Использование уточненной методики позволили оценить влияние различных факторов на показатели эффективности конденсатора в целом и распределение пара по отдельным зонам (трубным пучкам) конденсатора.

### Список литературы:

1. Федоров В.А., Мильман О.О. Конденсаторы паротурбинных установок. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013
2. Бродов Ю.М., Савельев Р.З. Конденсационные установки паровых турбин. М.: Энергоатомиздат, 1994
3. Xu D, Ke Y, Wang S. Universal method for calculating the power/back pressure characteristics of a steam turbine and its applications // J. Eng. Thermal Energy & Power. 2010. V. 25. Is. 6. P. 605–608

УДК 536.24

## ОХЛАЖДЕНИЕ МОДЕЛИ ДИВЕРТОРНОГО МОДУЛЯ ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ОДНОСТОРОННЕМ НАГРЕВЕ

Демидов А.С., Варава А.Н., Дедов А.В., Захаренков А.В., Комов А.Т.

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»,  
630090, Россия, Москва, Красноказарменная ул., 13

В современной технике часто возникает необходимость отведения тепловых потоков с плотностью энергии уровня от сотен кВт/м<sup>2</sup> до нескольких десятков МВт/м<sup>2</sup>, при этом охлаждаемые объекты по своим массогабаритным параметрам весьма разнообразны.

Например, тепловой поток при проектировании силовой электроники следующего поколения может превышать 1 МВт/м<sup>2</sup> в среднем на уровне чипа и 1,5-5 МВт/м<sup>2</sup> в горячих точках [1].

Температуры различных термонапряженных элементов в области авионики (могут достигать 1800°С) и значительные тепловые потоки [2] существенно снижают ресурс двигателей, увеличивают число отказов и вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Мощность тепловой нагрузки на приёмные диверторные пластины токамака КТМ может достичь 10—20 МВт/м<sup>2</sup> [3], что сравнимо с ожидаемыми нагрузками в диверторной области строящегося термоядерного реактора ИТЭР.

Вышесказанное стимулирует поиски новых эффективных методов охлаждения элементов, подвергающиеся значительным тепловым нагрузкам. Одним из способов охлаждения высокотемпературных элементов является использование диспергированного потока теплоносителя. В основе этого метода охлаждения лежит процесс дробления струи или пленки жидкости на большое число капель и распределение их в пространстве. Устройства, обеспечивающие дробление жидкости, называют форсунками, а поток капель – распылом.

Для изучения возможностей спрея по охлаждению поверхностей, подверженных высоким тепловым потокам на базе кафедры ОФиЯС был сконструирован и смонтирован экспериментальный стенд.

Рабочий участок (РУ) представляет собой медный блок (см. рис. 1), в котором установлено 11 термопар ХА. Верхняя грань РУ подвергается нагреву при помощи электронного пучка, а внутренний канал РУ орошается спреем.

Расположение термопар на рабочем участке позволяет отслеживать температурное поле по толщине РУ, а так же позволяет оценить значение плотности теплового потока в разных сечениях.

Электронный пучок формируется в электронно-лучевой пушке ТЭТА 60Н60, с максимальным ускоряющим напряжением 60 кВ и током пучка 1000 мА. Программное обеспечение, поставляемое в комплекте с пушкой, предоставляет возможность создания необходимого сканирующего пучка путем включения вертикальной и горизонтальной разверток.

Для охлаждения рабочего участка используется диспергированный поток теплоносителя, формируемый пневматической форсункой с заданной геометрией.

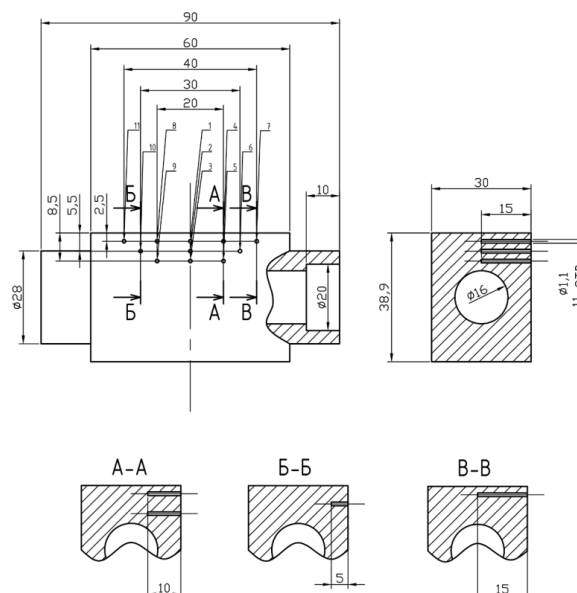


Рис. 1. Чертеж рабочего участка

Предварительно выполненные оптическими методами исследования позволили оценить размеры капель диспергированного потока на выходе из форсунки, среднее значение которых составило 35 мкм.

В результате обработки первой серии экспериментальных данных величина отводимого теплового потока составила около 5 МВт/м<sup>2</sup> при следующих режимных параметрах спрея: массовый расход воды на входе в форсунку  $G_{\text{вод}} = 0,018$  кг/сек, массовый расход воздуха на входе в форсунку  $G_{\text{возд}} = 0,0016$  кг/сек, температура воды и воздуха на входе в форсунку  $T_{\text{вод}} \approx 11^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{возд}} \approx 20^\circ\text{C}$  соответственно. Эксперименты проведены при значениях электрической мощности в диапазоне от 1,0 до 3,5 кВт.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о высокой эффективности диспергированного способа охлаждения и возможностях повышения значений отводимого теплового потока этим способом охлаждения.

### Список литературы:

1. Kim, J.H. Spray Cooling Heat Transfer: The State of the Art // Int. J. Heat Fluid Flow. 2008. Т. 28. № 4. С. 753-767.
2. Колычев А.В., Керножицкий В.А. Тепловая защита гиперзвуковых летательных аппаратов (ЛА) с использованием явления термоэлектронной эмиссии // Решетневские чтения. 2009. Т. 1. № 13. С. 29-30.
3. Вертков А.В., Жарков М.Ю., Люблинский И.Е. и др. Новый вариант литиевого дивертора токамака КТМ // ВАНТ. Серия термоядерный синтез. 2019. Т. 42. № 4. С. 5-8.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 21-79-10179.

УДК 53.043

## ТЕПЛОЙ ВЗРЫВ ОДИНОЧНЫХ ЧАСТИЦ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Деревич И.В., Клочков А.К.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
DerevichIgor@bmstu.ru

Взрывы облаков мелкодисперсных частиц, взвешенных в турбулентном неизоэтермическом потоке газа, могут быть причиной техногенной катастрофы. Тепловой взрыв в облаке частиц отражает коллективное тепловое взаимодействие тепловыделяющих частиц и среды. Мы рассматриваем в этом докладе тепловой взрыв одиночных частиц, внутри которых происходит экзотермическая химическая реакция. Частицы находятся в турбулентном потоке газа. Случайная температура газа складывается из постоянной осредненной компоненты и флуктуаций. На траектории частицы флуктуации температуры моделируются случайным процессом Гаусса с заданной дисперсией и автокорреляционной функцией (цветной шум).

Исследование проведено в рамках подходов Лагранжа и Эйлера. В подходе Лагранжа на основе решения системы стохастических обыкновенных дифференциальных уравнений рассчитываются актуальные случайные флуктуации температуры газа и частиц. На основе результатов расчетов исследуется динамика эмпирической функция плотности вероятности распределения случайной температуры частиц. В подходе Эйлера выводится нестационарное замкнутое уравнение для функции плотности вероятности случайных температур частиц (ФПВ), которое численно интегрируется на основе оригинальной консервативной разностной схемы.

На рис. 1 представлены примеры случайной траектории температуры частиц в турбулентном неизоэтермическом потоке газа. Начальная температура частиц такова, что при постоянной температуре газа взрыв никогда не произойдет. Однако для неизоэтермической турбулентности газа температура частиц перейдет в область высокотемпературного реагирования. Этот эффект объясняется двумя причинами.

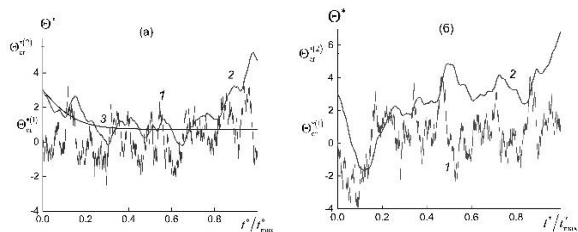


Рис. 1. Примеры траекторий температуры частиц в случайном поле температуры среды без теплового взрыва (а) и с тепловым взрывом (б): 1 – флуктуации температуры среды, 2 – флуктуации температуры частиц, 3 – температура частиц в детерминированном случае.

Во-первых, случайный процесс с ненулевой вероятностью выйдет за любой назначенный уровень. Во-вторых, вследствие нелинейной зависимости тепловыделения от температуры по закону Аррениуса ФПВ

температуры частиц дрейфует к критическому значению, после которой происходит тепловой взрыв.

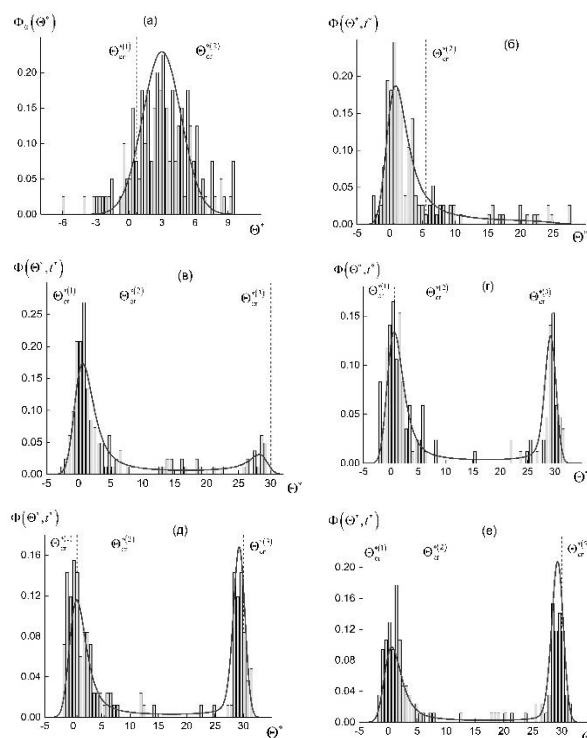


Рис. 2. Расчет динамики изменения ФПВ случайной температуры частиц. Столбики – эмпирическая ФПВ, линии – решение замкнутого уравнения для ФПВ: (а)  $t^* = 0$ , (б) 15, (в) 37, (г) 60, (д) 80, (е) 100

На рис. 2 показана динамика изменения эмпирической ФПВ (столбики) и функции плотности вероятности распределения случайной температуры частиц (кривые). Начальная ФПВ температур частиц выбрана таким образом, чтобы основная масса частиц имела температуру ниже критического значения  $\Theta_{cr}^{*(2)}$  (рис. 2а). С течением времени появляется доля частиц, температура которых существенно выше критического значения (рис. 2б, 2в). Следствием флуктуаций температуры среды является тепловой взрыв частиц, приводящий к отчетливой бимодальной структуре ФПВ (рис. 2г, 2д, 2е). Из рис. 2 также видно, что результаты расчетов ФПВ на основе прямого численного моделирования и расчетов ФПВ на основе решения замкнутого уравнения (подход Эйлера) удовлетворительно согласуются.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-08-01061).

УДК 621.9

## СТАЦИОНАРНЫЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ В СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ПО ПЛОТНОСТИ СДВИГОВОМ ТЕЧЕНИИ

Держо О.Г.

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

В последнее время значительные усилия были направлены на моделирование уединенных внутренних гравитационных волн в стратифицированных течениях. Долгоживущие уединенные волновые возмущения в мелководных жидкостях могут быть связаны с локальным балансом между нелинейностью и дисперсией, и возможной моделью является уравнение Кортевега-де Вриза (КдВ) [1]. Закон дисперсии гравитационных волн в невязкой жидкости определяется конкретной геометрией задачи, а нелинейность зависит от амплитуды возмущения, а также от конкретных свойств волновода, т.е. структуры плотностной стратификации, сдвига и условий на границах волновода. Уединенные двумерные стационарные внутренние волны большой амплитуды, распространяющиеся в стратифицированной мелкой жидкости между свободной поверхностью и горизонтальным дном, описываются амплитудным уравнением, полученным с помощью регулярной асимптотической процедуры, включающей сложную нелинейность и дисперсию Кортевега-де Вриза (КдВ). Обсуждается влияние структуры поля плотности и внешнего сдвигового течения на форму и скорость уединенных волн. Аналитически подробно рассмотрен частный случай постоянной частоты плавучести и квадратичного полинома для сдвигового течения под свободной поверхностью. Показано, что для таких гидрофизических профилей уравнение для амплитуды волны сводится к смешанно-модифицированному уравнению КдВ и ему подчиняются волны конечной амплитуды вплоть до обрушения волны и образования замкнутых линий тока внутри неё. В этом случае могут проявляться появиться волны-убийцы, определено условие их возникновения. В системе отсчета двигающейся с фазовой скоростью волны была построена асимптотическая процедура использующая разложение для функции тока, основанное на использовании малых параметров, характеризующих слабость и слабую нелинейность стратификации (1), слабость внешнего сдвигового течения по сравнению с фазовой скоростью волны (2) и приближение длинных волн (3).

$$\rho_0(z) = \rho_{00}[1 - \sigma \hat{f}(z)] \quad \hat{f}(z) = z + \delta f(z),$$

$$\sigma \ll 1, \delta \ll 1, f \sim 1 \quad (1)$$

$$k = \frac{\max U(z)}{c} \ll 1 \quad (2)$$

$$\mu = h/L \ll 1 \quad (3)$$

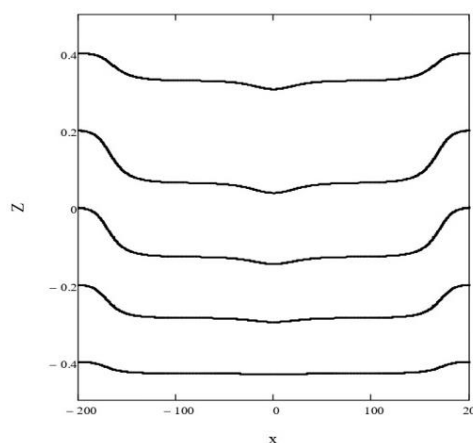
Были приняты следующие обозначения  $\rho_0(z)$  - невозмущенное поле плотности,  $\sigma$  - параметр Буссинеска,  $\delta$  - параметр, характеризующий масштаб отклонения от линейного профиля плотности,  $h$  тол-

щина стратифицированной жидкости,  $L$  - характерный горизонтальный размер волны,  $U(z)$  - профиль внешнего сдвигового течения,  $\Psi$  - функция тока низшего приближения, определённая с точностью до квадрата параметра длинноволности  $\mu$  (4),  $x, z$  - горизонтальные и вертикальные координаты, соответственно, невозмущённые границы жидкости находятся на  $z = \pm 0.5$ ,

$$\Psi = z + A(x) \cos(\pi z) \quad (4)$$

$$A_{xx} + a_0 A - \frac{\sigma}{\mu^2} \{a_1 A + a_2 A^2 + a_3 A^3\} + \frac{\delta}{\mu^2} \text{Int}_\delta - \frac{k}{\mu^2} \text{Int}_k = 0, a_i = \text{const} \quad (5)$$

Амплитудная функция волны находится из условий разрешимости первого приближения асимптотической процедуры, основанной на разложении по квадрату параметра, характеризующего длинноволное приближение. Как следует из (5) полученное уравнение является обобщённым уравнением Кортевега-де Вриза, содержащим как квадратичную и кубическую нелинейности (пропорциональные параметру Буссинеска) так и сложные интегральные нелинейности, пропорциональные параметрам, характеризующими структуру стратификации и внешнего сдвигового течения. Сложные профили сдвига приводят к нелинейности более высокого порядка, многомасштабным волнам, пример изолиний которых показан на рисунке, а также к различным неустойчивостям. Такие волновые структуры изучаются численно. Представлено аналитическое решение в виде бора, имеющее как экспоненциальную, так и алгебраическую асимптоты.



Список литературы:

1. Helfrich K.R., Melville W.K., Long nonlinear internal waves// Ann. Rev. Fluid Mech., 2006, T. 38, C. 395.

Работа выполнена в рамках гос. задания  
121031800215-4.

УДК 539.171, 539.198

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ РАССЕЙНИЯ МАЛЫХ КЛАСТЕРОВ

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

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

Исследование истечения газовых потоков, расширяющихся в сильно разреженное пространство или вакуум, является важной научно-технической задачей. Несмотря на то, что пик развития газовой динамики как научной области пришёлся на середину прошлого столетия, новые методологические и исследовательские подходы появляются и сегодня. Важнейшей методикой исследования разреженных газовых потоков является молекулярно-пучковая диагностика [1].

Формируемый молекулярный пучок представляет собой хорошо сфокусированный поток невзаимодействующих частиц. При проведении измерений с использованием этого метода одним из факторов, искажающих получаемые в эксперименте данные, может стать рассеяние частиц молекулярного пучка на фоновом газе. Оно возникает, например, в том случае, когда поток исследуемых частиц интенсивен настолько, что, в силу ограниченности откачной системы, в области распространения молекулярного пучка (послескиммерная камера молекулярно-пучковой системы) создается значимое давление фонового газа. В этом случае частицы пучка в условиях однократных столкновений отклоняются от первоначальной траектории и не попадают через коллимирующую диафрагму в камеру детектора, имеющего независимую высоковакуумную откачку и не регистрируются используемым детектором (в данной работе - квадрупольным масс-спектрометром). При варьировании фонового давления в послескиммерной камере регистрируемый детектором сигнал,  $I$ , будет меняться по закону [2]:

$$\frac{I}{I_{max}} = e^{-\sigma n_{ps} l}, \quad (1)$$

где  $I_{max}$  – сигнал детектора в отсутствие рассеяния,  $n_{ps}$  – плотность фоновых частиц,  $\sigma$  – дифференциальное сечение упругого рассеяния, зависящее от сорта частиц и телесного угла детектора,  $l$  – длина пути частиц в послескиммерной секции. Как правило, для определения дифференциального сечения рассеяния используется апертура коллимирующей диафрагмы, обеспечивающая попадание на детектор только частиц, не претерпевших сколько-нибудь существенного отклонения вследствие столкновения. Нельзя допустить также условий многократного рассеяния.

В то время, как процесс рассеяния одиночных атомов или молекул является достаточно изученным, рассеяние Ван-дер-Ваальсовых кластеров [3], формируемых в холодных потоках, можно считать новой областью исследований. В данной работе рассмотрены особенности рассеяния газовых кластеров в сравнении с мономерами.

Работа выполнена на газодинамическом комплексе НГУ «ЛЭМПУС-2» [4] с использованием молекулярно-пучковой системы, давление фонового газа в

послескиммерной секции которой варьировалось при помощи натекателя. Рассмотрено рассеяние молекулярного пучка аргона, сформированного из сверхзвуковой кластированной струи. В качестве рассеивающего газа выбран диоксид углерода, имеющий незначительное (10%) отличие в массе. В работе обсуждаются особенности метода исследования рассеяния кластированных потоков при использовании молекулярно-пучковой масс-спектрометрии.

Результаты измерений представлены на рис. 1.

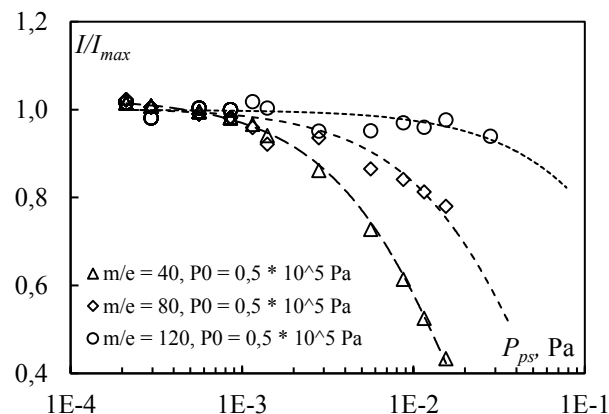


Рис.1. Зависимость отношения амплитуды сигнала, регистрируемого масс-спектрометром, к ее максимальному значению  $I/I_{max}$  от давления в послескиммерной секции  $P_{ps}$  при рассеянии Ar на  $CO_2$ .

На графике приведены данные по рассеянию мономеров (треугольные маркеры), димеров (ромбы) и тримеров (круглые значки) в зависимости от давления фонового газа при фиксированных условиях на входе в скиммер молекулярно-пучковой системы. Падение амплитуды сигналов хорошо описывается экспоненциальными зависимостями, при этом рассеяние мономеров больше, чем кластеров. Исходя из аппроксимации наблюдаемых зависимостей, получены значения сечений рассеяния Ar ( $2.3 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$ ),  $Ar_2$  ( $8.1 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ),  $Ar_3$  ( $1.1 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ ).

### Список литературы:

- Greene F. T., Milne T. A., J. Chem. Phys., 1963, V. 39, No. 11, p. 3150–3151.
- Leonas V B, Sov. Phys. Usp., 1964, V. 7, p. 121–144.
- Hagena O. F., Surf. Sci., 1981, V. 106, No 1–3, p. 101–116.
- Zarvin A.E., Kalyada V.V., et al. IEEE Transact. Plas. Sci., 2017, V. 45, No. 5, p. 819–827.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Прикладная физика» физического факультета НГУ при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №. 22-11-00080).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ГАЗО-СПРЕЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Димов С.В., Пуховой М.В., Сибиряков Н.Е., Кабов О.А.

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

Спрейное охлаждение является эффективным методом охлаждения мощных электронных, энергетических систем [1–3]. Однако охлаждающая способность и эффективность спрейнго охлаждения нуждаются в дальнейшем улучшении, чтобы соответствовать требованиям сверхмощных приложений следующего поколения [4–6]. Одним из наиболее перспективных и, вместе с тем, наименее изученных методов спрейнго охлаждения является газо-спрейнго, использующее вспомогательный газ при распылении охлаждающей жидкости

Для охлаждения источников тепла с высоким тепловым потоком изготовлена испытательная установка с замкнутым контуром распылительного охлаждения. На рис. 1 приведена схема экспериментального стенда для исследования газо-спрейнго охлаждения. Основные элементы стенда включают рабочий участок с нагревателем, систему подачи и измерения расходов воды, газа, форсунку, систему видео-фиксации процесса охлаждения поверхности нагревателя, компьютер, систему сбора данных. Для подачи воды в форсунку используется дозировочный насос с расходомером. Подача воздуха от компрессора осуществляется через регулятор расхода Bronkhorst. Форсунка В1/4J-SS расположена над центром нагревателя на регулируемом расстоянии. Вода циркулирует между насосами, рабочим участком и двумя теплообменниками: основным теплообменником и термостатом Huber MPC-K6 для точного задания температуры воды на входе в форсунку. Расход жидкости дополнительно контролируется при помощи ультразвукового расходомера.

Нагреватель выполнен по оригинальной схеме и обеспечивает мощность уровня 1.5 кВт, с соответствующими источниками питания и пальчиковыми нагревателями. Система термопар К и Т типа обеспечивает

определение теплового потока, выделяемого на поверхности нагревателя, и утечек тепла в окружающую нагреватель нержавеющей пластину.

Диагностика капель двухфазного потока после форсунки и пленки воды на нагревателе осуществляется высокоскоростной камерой с объективами высокого пространственного разрешения и необходимыми источниками освещения, что позволяет детально исследовать режимы течения двухфазного потока в газоспрейнго системе охлаждения. Система оснащена цифровой фиксацией всех параметров стенда и записью на накопитель информации.

В широком диапазоне расходов жидкости и газа исследована эффективность газоспрейнго охлаждения от нагреваемой поверхности при разных тепловых потоках, расходах жидкости, воздуха.

### Список литературы:

1. Xu R., Wang G. and Jiang P. Spray Cooling on Enhanced Surfaces: A Review of the Progress and Mechanisms// Transactions of the ASME. Journal of Electronic Packaging. 2021. V. 144 /10802-1-21.
2. Liang G. Mudawar I. Review of spray cooling – Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux// Int. J.Heat Mass Transf. 2017. V.115. P.1174–1205.
3. Liang, G.; Mudawar, I. Review of spray cooling–Part 2: High temperature boiling regimes and quenching applications// Int. J.Heat Mass Transf. 2017. V. 115. P. 1206–1222.
4. Khandekar S.; Sahu G.; Muralidhar K.; Gatapova E.Y.; Kabov O.A.; Hu R.; Luo X.; Zhao L. Cooling of high-power LEDs by liquid sprays: Challenges and prospects// Appl. Therm. Eng. 2021. V.184. 115640.
5. Pukhovoy M.V., Bykovskaya E.F., Kabov O.A. Extreme heat fluxes and heat transfer mechanisms during electronics spray and jet impingement cooling with boiling// Journal of Physics: Conference Series 1677 (2020) 012150.
6. Pukhovoy M.V., Kunts K.A., Spesivtsev S.E., Kabov O.A. Maximum heat fluxes and features of heat transfer mechanisms with boiling during jet impingement cooling of electronics// Journal of Physics: Conference Series 1867 (2021), 012036.

*Исследование выполнено в рамках  
государственного задания  
ИТ СО РАН 121031800213-0*

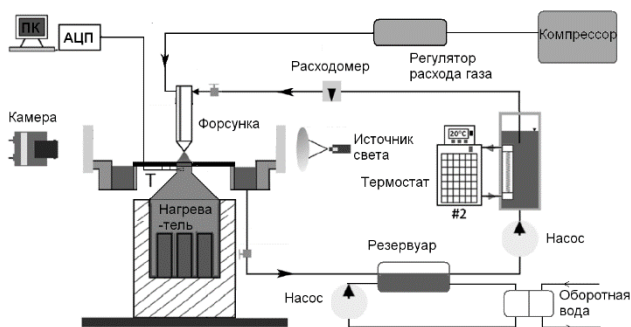


Рис. 1. Схема установки газо-спрейнго охлаждения.

УДК 66.097.3:662

## 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]. В промышленности основная реакция протекает на никелевом катализаторе. Для выполнения паровой конверсии метана в микроканальных реакторах чаще используют катализаторы благородных металлов [2]. Опыты [2, 3], проведенные с родиевым катализатором показали его высокую активность и стабильность при существенно меньших температурах, чем на никелевом катализаторе.

В данной работе проведено экспериментальное исследование паровой конверсии метана в двух типах микроканального реактора. В первом реакторе теплообменнике процесс исследовался на сборке корrugированных пластин, с нанесенными на их поверхность катализатором (Рис. 1а). Катализатор паровой конверсии метана имел состав 5%Rh/3%La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/2% BaO /гамма-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Пластины фехрала X23Ю5Т толщиной 250 мкм размером 14×1.2 см были очищены этиловым спиртом с применением ультразвука, травились в 0,1 М растворе HCl при 60°C в течение 30 мин, затем выдерживались при 1000°C 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 TiO<sub>2</sub> с целью ингибирования коррозии и увеличения адгезии катализатора к поверхности металла. Катализатор наносили аэрозольным способом (2549619 RU), прокаливали при 500°C. Во втором варианте эксперименты проведены для многоканального реактора (Рис. 1б) с зазором каналов 1 мм, заполненных мелкодисперсным никелевым катализатором с фракцией 80–280 мкм. Температура реактора измерялась изолированной термопарой в специальном пазе центральной пластины, которая была толщиной 1.5 мм. Расход газовой смеси устанавливался контроллером расхода Bronkhorst, в опытах измерялись расход и

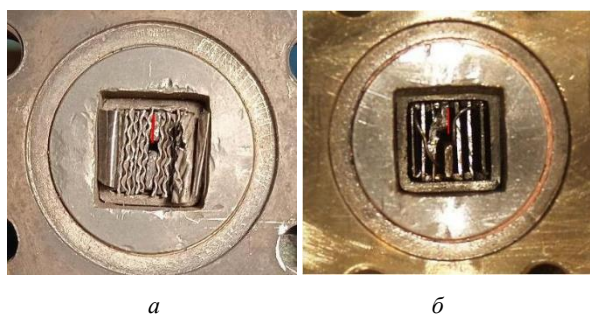


Рис. 1. Микроканальный реактор для паровой конверсии метана: а – с нанесенным на поверхности пластин Rh катализатором, б – с засыпкой никелевого катализатора. Красной стрелкой указан паз для введения термопары К типа.

состав продуктов реакций с использованием хроматографа Маэстро. Температура в рабочем участке создавалась внешним электрическим нагревателем.

Важным параметром проводимой реакции синтеза является степень конверсии метана  $X_{CO} = (n_{CH_4,in} - n_{CH_4,out}) / n_{CH_4,in}$  в зависимости от температуры и времени контакта, где  $n_i$  молярный расход CH<sub>4</sub>. На рис. 2 приведена степень конверсии метана от времени при температуре реактора ~ 700°C.

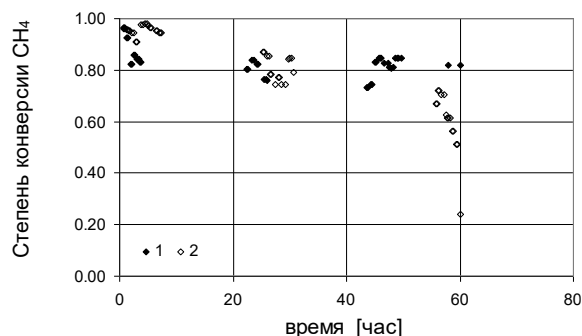


Рис. 2. Степень конверсии метана от времени для микроканального реактора с корrugированными пластинами (точки 1), с засыпкой в микроканалы (2).

Сравнение полученных данных с результатами по степени паровой конверсии в кольцевом микроканале [4] указывает на примерно одинаковую эффективность реакции, но при больших временах контакта. При проведении опытов для данного реактора оказалось сложным выдерживать изотермические условия опыта. Толщина и теплопроводность фехральных пластин не позволили эффективно передавать тепло от внешней стенки к внутренним слоям катализатора. Увеличение расхода входной смеси приводит к небольшому уменьшению степени конверсии при исследуемых расходах. Такой же результат был получен для микроканального реактора с засыпного катализатора. Для никелевого реактора наблюдается большая степень деактивации от времени вследствие сажеобразования.

### Список литературы:

1. Арутюнов В.С., Крылов О.В. Окислительные превращения метана. 1998. М.: Наука.
2. Kuznetsov V.V., Vitovsky O.V., Gasenko O.A. Methane Steam Reforming in an Annular Microchannel with Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst// J. Eng. Therm. 2009. V/18. P. 187 – 196.
3. 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 533.6.071.4

## ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТРУЙ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ ПРИ МАЛЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СКОРОСТЯХ

Добросельский К.Г.

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

Поле течения, связанное с поперечной струей или инжектируемое струей в поперечный поток, имеет широкое применение, особенно в энергетических и двигательных установках, в том числе благодаря своим превосходным характеристикам смешения в ближней зоне [1]. Поперечные струи также встречаются в системах контроля окружающей среды, включая контроль стоков из дымоходов и шлейфов дымовых труб, а также рассеивание жидких стоков в реках.

В настоящей работе представлено экспериментальное исследование с использованием термоанемометрических измерений распространения вертикальных приподнятых круглых струй, вдуваемых нормально в сносящий воздушный поток. Получены основные характеристики сносимых потоком одиночных струй, включая траекторию и дальность, размеры динамического и теплового пограничных слоев, изменение осевых значений скорости и температуры вдоль распространения. Рассмотрено взаимодействие пучка их четырех изотермических струй между собой и сносимым потоком.

Для проведения экспериментальных исследований использовалась аэродинамический канал незамкнутого типа [2] длиной 5,5 м и поперечным сечением 0,8×0,5 м. На рис. 1 представлена полученная автором задымленная струя, которая выбрасывается из трубки с внутренним диаметром  $d = 22$  мм (внешний диаметр 28 мм) под прямым углом к направлению движения воздушного потока.

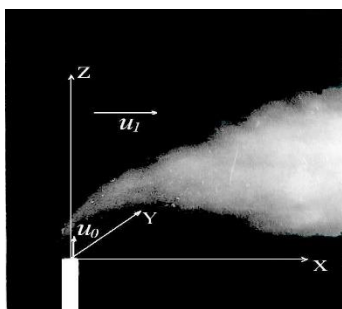


Рис. 1. Струя в поперечном потоке:  $u_0$  – скорость струи;  $u_1$  – скорость поперечного потока.

Значения чисел Рейнольдса для воздушных струй, формирующихся в вертикальных трубках, составляли  $Re_0 = u_0 d / \nu = (2,7-6,9) \times 10^3$  ( $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха). Отношение скоростей струи к поперечному потоку составляло  $r = 0,95-2,5$ . В центральной части канала был сформирован равномерный поток с числом Рейнольдса  $Re_1 = u_1 D / \nu \approx 8,5 \times 10^4$  ( $D$  определяется из равенства площадей поперечного сечения канала и круглой трубы).

Показано, что структура начального участка струи, нормально вдуваемой в поперечный поток, и особенности тепло- и массопереноса на этом участке определяют дальнейшее течение этой струи и ее взаимодействие с окружающей средой.

Были проведены исследования распространения изотермического струйного течения от четырех трубок, расположенных поперек сносимого потока (рис. 2). В ходе эксперимента исследовался следующий режим течений: скорость сносимого потока  $u_1 = 2,05$  м/с, скорость воздуха на выходе из трубок  $u_0 = 4,6$  м/с.

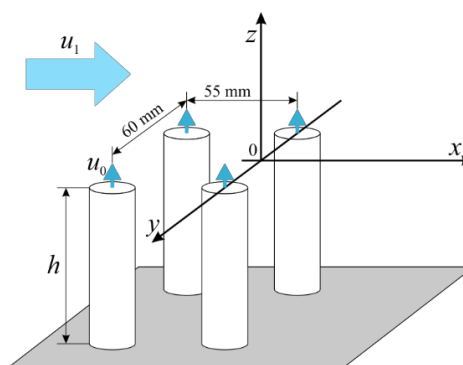


Рис. 2. Измерительная схема.

Для исследования взаимодействия струй был выбран метод визуализации течения посредством построения изолиний скорости (изотак) в различных сечениях  $x = \text{const}$ ,  $y = \text{const}$ ,  $z = \text{const}$ ; с последующим анализом изменения картины изолиний от сечения к сечению. Построение изолиний скорости произведено с помощью математического процессора MathCad 2000 Professional.

Анализ изолиний скорости в различных сечениях показал, что взаимодействие струй идет очень сложным образом; и в этом взаимодействии, помимо струй и сносимого потока, участвует область под струями, образованная наложением следов от трубок и струй. Примечательно также существенное различие интенсивностей смешения вдоль осей  $y$  и  $z$ ; это приводит к тому, что два ряда струй сливаются в один, но струи одного ряда не сливаются между собой.

### Список литературы:

1. Karagozian Ann R. Transverse jets and their control // Prog. Energy Combust. Sci. 2010. V. 36. Iss. 5. P. 531-553.
2. 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 62-634.5

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЖИДКИХ БИОТОПЛИВ**

Дорохов В.В., Антонов Д.В., Няшина Г.С., Стрижак П.А.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

В течение последних десятилетий наблюдается устойчивый рост потребления электрической энергии. В связи с этим, все более часто поднимаются вопросы о скором истощении ископаемых ресурсов при сохранении текущей тенденции их потребления. Одним из путей решения данной проблемы может послужить использование композиционных топлив на основе различных видов растительных отходов и биомассы. Целью данной работы является изучение характеристик термического разложения перспективных топливных смесей на основе биомассы с применением термогравиметрического анализа (ТГА). Рассмотрено влияние компонентного состава топлива на характеристики его разложения, а также синергетические эффекты, возникающие между отдельными компонентами смеси.

Для изучения стадий и характеристик разложения топливных суспензий использовался ТГА анализатор METTLER-TOLEDO TGA/DSC 3+. Образец топлива массой 40 мг помещался в тигель из окиси алюминия и нагревался от 25 до 700°C со скоростью нагрева 20°C/мин. В качестве окислительной среды использовался воздух при постоянном расходе 60 мл/мин. Систематическая погрешность измерения температуры составляла  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , систематическая погрешность измерения массы равнялась 5 мкг.

В качестве компонентов композиционных топлив использовались основные опилки, рапсовое масло и вода. В рамках данного исследования рассматривались следующие топливные композиции: (i) рапсовое масло 90%, вода 10%; (ii) рапсовое масло 80%, вода 10%, опилки 10%; (iii) рапсовое масло 70%, вода 10%, опилки 20%; (iv) рапсовое масло 25%, вода 25%, опилки 50%. Для приготовления композиционных топлив использовалась магнитная мешалка AIBOTE ZNCLBS-2500.

На рисунке 1 представлены TG/DTG профили, полученные при термическом разложении исследуемых топлив. Степень выгорания всех топлив оказалась более 99.5%. Полученный результат обусловлен низкой зольностью используемых компонентов, в результате чего вся масса топлива подвергается термическому разложению. Для опилок и суспензий с их добавками наблюдалось три стадии термического разложения, включающие в себя сушку и испарение, выход и горение летучих, а также разложение углеродного остатка. Наибольшие различия между топливными смесями с добавками рапсового масла и опилок наблюдались на этапах выхода и горения летучих, а также горения коксового остатка. Другим эффектом, связанным с добавлением опилок к водомасляной эмульсии, является смещение TG/DTG профилей в зону меньших температур (рис. 1). Это вызвано высокой реакционной способностью опилок, использование которых позволяет снизить температуру зажигания топливной смеси.

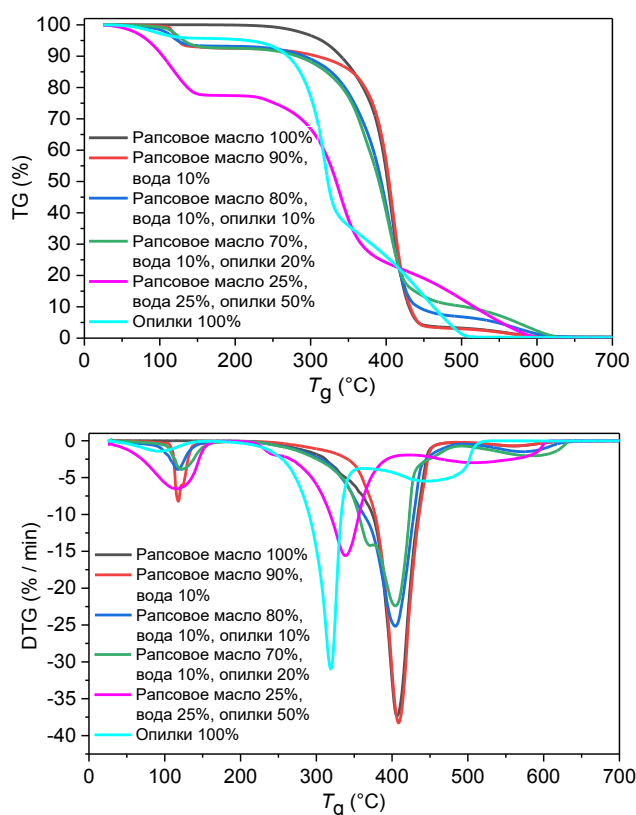


Рис. 1. TG/DTG профили исследуемых топлив при скорости нагрева 20°C/мин.

Результаты термогравиметрического анализа биотоплив на основе твердых и жидких растительных компонентов показали, что их использование характеризуется высоким потенциалом с точки зрения энергетических характеристик. Обладая высокой реакционной способностью, данные топлива могут зажигаться (температуры зажигания составили 283–342 °C) и полностью прогорать (температуры полного выгорания лежали в диапазоне 516–642 °C) при достаточно невысоких температурах, тем самым снижая затраты тепловой энергии на инициирование процесса зажигания и горения. Помимо этого, биотоплива продемонстрировали высокую степень прогорания (более 99%) и скорости горения (15.58–38.27 %/мин), что обеспечивается высокой долей летучих и низкой зольностью растительных компонентов.

## Список литературы:

1. Антонов Д.В., Дорохов В.В., Няшина Г.С. Предельные условия зажигания и временные характеристики горения капель жидких биотоплив // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2022. № 3. С. 38-43.

*Исследования, связанные со сжиганием биотоплив, выполнены при поддержке гранта Президента РФ МД-1616.2022.4. Изучение процессов пиролиза и термического разложения биомассы производилось при поддержке гранта РФФИ № 19-53-80019.*

## МНОГООЧАГОВОЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ГОРЮЧИХ ПЕН

Дрожжин А.П., Громов К.О.

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

Пена – это дисперсная система, которая может состоять из газовой дисперсной фазы и жидкой дисперсионной среды. Такая система формируется либо динамически при непрерывной инъекции пузырьков газа в объём жидкости, либо при помощи пеногенератора с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ), обеспечивающих устойчивость пены во времени. Пены на водной основе с горючей газовой фазой могут образовываться в различных технологических процессах, что приводит к необходимости проводить исследования закономерностей горения таких газо-жидкостных сред. Ранее в открытых цилиндрических камерах сгорания были выявлены [1, 2] такие свойства горючих пен, как, например, немонотонность зависимости скорости горения пены от её кратности  $k$  (отношения объёма пены к объёму жидкой фазы), увеличение скорости горения низкократных пен ( $30 < k < 210$ ) при уменьшении диаметра камеры, влияние акустического воздействия и прочностных характеристик на процессы теплового разрушения пен. В качестве жидкой фазы авторы [3] использовали эмульсию углеводов в воде и исследовали закономерности горения вспененных эмульсий, обнаружив, в частности, режим «воспламенение – погасание», характеризующийся регулярным затуханием и возобновлением горения за счёт самовоспламенения паров жидкого топлива. Таким образом, горючие пены обнаруживают ряд интересных физических свойств, дальнейшее изучение которых может расширить область применения таких газо-жидкостных сред.

Целью работы является физическое моделирование сгорания пены на тяговой стенке водного двигателя [4, 5]. Раздельное выдувание в воду топлива и окислителя в виде одного пузыря в цилиндрическую камеру двигателя за время до 40 мс приводит к стохастичности процесса формирования тяги ([http://swsl.hydro.nsc.ru/video/Cylinder\\_80\\_50.mp4](http://swsl.hydro.nsc.ru/video/Cylinder_80_50.mp4)) вследствие неполного сгорания смеси. Для устранения этой проблемы предполагается инжектировать горючую пену на тяговую стенку и осуществлять турбулизацию смеси в процессе её теплового разрушения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования горения пропан-кислородных пен с дисперсионной средой, содержащей дистиллированную воду и ПАВ. В отличие от предыдущих работ, инициирование воспламенения пены осуществлялось в закрытой плоской камере как искровыми разрядами, так и взрывающимися медными проволочками ( $N \leq 7$ ) при  $k < 10$ . Высота прямоугольной камеры – 6 мм, максимальные значения длины  $L$  и ширины  $H$  – 70 и 56 мм, соответственно. Выполнена ско-

ростная видеорегистрация процессов горения при варьировании  $L$ ,  $H$  и  $k$ , теплопроводности стенок камеры.

Обнаружено возникновение локальных очагов самовоспламенения пены при расширении зон горения 1 (см. рис. 1). Эти очаги, в зависимости от значений  $N$ ,  $H$  и  $L$ , могут возникать как между принудительно созданными зонами, так и на противоположной стенке камеры. При этом, зоны 1 и очаги самовоспламенения 2 отделены друг от друга слоем сжатой пены. Кроме того, обнаружен режим горения, аналогичный режиму «воспламенение – погасание» для вспененных эмульсий. Однако, механизм его существования имеет принципиальное отличие, заключающееся в способности пены ингибировать процесс горения в зависимости от степени её сжатия. Показано, что такой механизм служит причиной частичного сгорания пены в замкнутом объёме. Управляемая генерация очагов самовоспламенения приводит к сгоранию всего объёма пены и вызывает интенсивный тепломассоперенос по всему объёму камеры. Определены критерии формирования очагов самовоспламенения горючих пен.

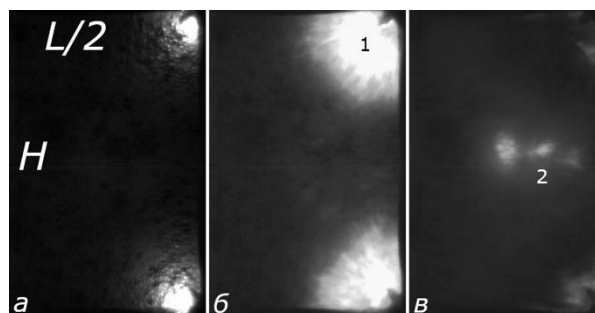


Рис. 1. Многоочаговое воспламенение пропан-кислородной пены при  $N=2$ ,  $H=56$  мм,  $L=70$  мм и  $C_3H_8+5O_2$  (вид сверху). а – инициирование горения двумя искровыми разрядами в углах камеры (0 мс); б – расширение зон горения 1 (0,2 мс); в – генерация очагов самовоспламенения пены 2 (0,4 мс).

## Список литературы:

1. Замашиков В.В., Какуткина Н.А. Экспериментальные исследования закономерностей горения водоосновных пен, заполненных горючими газами // ФГВ. 1993. №2. С. 15-21.
2. Замашиков В.В., Какуткина Н.А. Влияние межфазного теплообмена на скорость горения пен // ФГВ. 1994. №6. С. 52-61.
3. Леонтьев А.И., Кичатов Б.В., Коршунов А.М. Горение вспененных эмульсий. Монография. М: 2017, 66 с.
4. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н. Сжигание газов в воде для генерации тяги // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24. №4. С. 599-608.
5. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н. Генерация тяги при сжигании газа в воде на плоской стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. №4. С. 655-661.

УДК 536.1; 536.4; 539.2

## ОБНАРУЖЕНИЕ ФЕРМИОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ В АТОМАХ ПРИ ТЕПЛОВОМ РАСШИРЕНИИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Дулин М.Н.

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

Анализируется база данных Института Теплофизики СО РАН по тепловому расширению простых веществ – элементов таблицы Менделеева на предмет отыскания для них единой аппроксимационной кривой, описывающей их зависимость от температуры. Существующая для этих целей известная формула Дебая, изначально полученная для описания теплоёмкости, рассматривает для твёрдых тел исключительно колебания их кристаллической решётки. И если для описания теплоёмкости достаточно рассмотрения гармонических колебаний, то для теплового расширения требуется обязательный учёт ангармонизма, без которого расширение было бы нулевым.

При квантовомеханическом рассмотрении гармонические колебания оказываются дискретными и по своей природе являются бозонами с симметричной волновой функцией. А вот в случае ангармонических колебаний считается, что такими их делает взаимодействие бозонов с фермионами – другим типом возбудителей с антисимметричной волновой функцией.

Поиском дополнительных к бозонам возбудителей – фермионов и посвящена данная работа. Для этого искомая аппроксимационная кривая  $\beta(T)$  была представлена суммой двух членов  $bT+c[1-\exp(-(T-f)/d)]$ : один в виде экспоненциальной зависимости представлял собой вклад фононов, другой являлся характерным линейным вкладом вырожденной системы фермионов. Коэффициенты  $b$  и  $c$  означали "амплитуды" соответствующих возбудителей, а  $f$  и  $d$  – "выход на режим" теплового расширения. Эти четыре коэффициента позволили увидеть то, что было невозможно сделать ранее с единственным подгоночным параметром функции Дебая. В частности, коэффициенты  $b$  и  $c$  показали не только ожидаемую периодичность в отношении порядкового номера таблицы Менделеева, но и удивительную корреляцию между собой, означающую сильную связь бозонных и фермионных возбудителей. Кроме того, они показали интересные индивидуальные закономерности в поведении  $s$ -,  $p$ - и  $d$ -элементов, связанные с последовательным добавлением в них одного электрона.

Температурные коэффициенты  $f$  и  $d$  тоже имели сильную корреляцию между собой. И тот, и другой внутри своей группы элементов уменьшались обратно пропорционально своему порядковому номеру. Было удивительным, что и начало, и "выход на режим" обоих типов возбудителей может так сильно зависеть от полного числа электронов в атоме или его атомного веса. Ожидалось, что колебания кристаллической решётки и возбуждение электронов в металлах можно возбудить при самых низких температурах, но это оказалось не так. Требовалась некоторая, для каждого элемента своя температура, начиная с которой, возбуждения становились возможными.

Не менее интересный результат был получен при безразмерном представлении изменения объёма образца от температуры до точки плавления для трёх  $p$ -элементов пятой группы: **As**, **Sb** и **Bi**. Для обезразмеривания этой зависимости использовались объём при абсолютном нуле и температура плавления. Неожиданно оказалось, что зависимости для всех трёх элементов совпадают, если в каждой из них предварительно вычесть единицу и умножить на полное число электронов в атоме или аналогично – на атомный вес элемента. Полученный результат означает, что, во-первых, фононы и фермионы вносят свой пропорциональный вклад в расширение этих элементов вплоть до температуры плавления. Во-вторых, само плавление может начаться только тогда, когда их расширение за счёт возбуждения внутренних фермионов не достигнет некой одинаковой величины, поделённой между всеми электронами атома. В-третьих, это соотношение показывает, что каждая порция энергии, переданная внутрь атома, делится на все его электроны, а потом возвращается обратно, обеспечивая тем самым термодинамическое равновесие между фононами и фермионами. Более того, становится понятным, за счёт чего обеспечивается необратимость столкновений атомов в механике: атомы просто «забывают свою историю» после столкновения.

С точки зрения квантовой механики Шрёдингера никакие тепловые возбуждения в атоме невозможны. Допускаются только переходы между электронными уровнями, соответствующие температурам в десятки тысяч градусов. И, тем не менее, наш анализ экспериментальных данных показывает, что тепловые возбуждения в атомах не только возможны, но и обеспечивают термодинамическое равновесие всей системы. Неожиданный выход из положения может дать уравнение Дирака, часто используемое для описания электронных оболочек атомов тяжелых элементов [1]. В нерелятивистском пределе для более лёгких атомов дираковская волновая функция стремится к шрёдингеровской с небольшой добавкой. Вот эта добавка и может играть роль тепловых фермионов, наблюдаемых в экспериментах по тепловому расширению. Так, для  $s$ -состояния электрона в атоме эта добавка в виде спин-орбитального взаимодействия представляет собой сферические гармоники, характерные уже для  $p$ -электронов. Поэтому известная ортогональность набора волновых функций в атоме позволяет надеяться и на обмен тепловой энергией между электронами, заполняющими разные уровни.

Список литературы:

1. Зайцевский А.В. Релятивистская теория электронного строения молекул. МГУ, 2005. 93 с.

УДК 532.13 533.16+536.71

## МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ КИСЛОРОДА В ЖИДКОСТИ, ГАЗЕ И ФЛЮИДЕ

Дугова О.С., Мешалкин А.Б.

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

Для описания экспериментальных данных по вязкости в достаточно широком интервале параметров состояния в настоящее время широко используются эмпирические зависимости вязкости как функции температуры и плотности. Различные варианты уравнений для расчета вязкости позволяют описывать экспериментальные данные в широкой области параметров состояния. Однако они содержат большое число коэффициентов, которое существенно увеличивается при попытке одновременного описания вязкости газа и жидкости.

С привлечением установленной ранее однозначной зависимости «избыточной» вязкости  $\Delta\eta$  жидкостей и плотных газов от плотности внутренней энергии  $\Delta U/V$  [1] было получено уравнение для расчета коэффициента вязкости кислорода в жидком, газообразном и флюидном состояниях

$$\eta_{cal}(T, P) = Ax \exp\left(\alpha \frac{x_0}{x_0 - x}\right) + B \left(\frac{T}{T_C}\right)^{0.25} \left(\frac{x}{x_0}\right)^{0.5} \exp(-\beta x / x_0) + \eta_{en}, \quad (1)$$

здесь  $x = \Delta U/V$  – плотность энергии взаимодействия;  $\Delta U = U_{ig}(T) - U(P, T)$  – энергия взаимодействия;  $U_{ig}(T)$  – внутренняя энергия идеального газа;  $U(P, T)$  – внутренняя энергия системы в заданном состоянии;  $x_0 = H_0^0 / V_0$ ,  $V_0 = \lim_{T \rightarrow 0, P \rightarrow 0} (V(T, P))$  – гипотетический объем переохлажденной до абсолютного нуля жидкости,  $H_0^0 = U_{ig}(0) - U(0, 0)$  – энтальпия испарения при абсолютном нуле температуры и давлении, равном нулю,  $\eta_{en}(T, p) = \eta_0(T)\Psi(bp)$  – вязкость системы твердых сфер по Энскогу;  $\eta_0(T)$  – вязкость разреженного газа,  $A$ ,  $\alpha$ ,  $B$ ,  $\beta$  индивидуальные подгоночные константы, которые необходимо найти из экспериментальных или табличных данных по вязкости.

Первый член обусловлен переносом импульса за счет межмолекулярного взаимодействия («полевой» механизм), второй – «смешанный» механизм [2], а третий дает вклад в перенос импульса при «столкновениях» частиц.

Подчеркнем, что для того, чтобы воспользоваться уравнением (1) для расчета коэффициента вязкости, необходимо располагать достаточно точными термическими и калорическими уравнениями состояния для расчета термических и калорических свойств вещества. Вся исходная информация по этим свойствам

взята из [3]. Коэффициент  $V_0$  найден по правилу Филиппова – Тиммерманса  $V_0/V_C = Z_C$ ,  $Z_C$  – фактор сжимаемости.

Предложенное уравнение позволяет с удовлетворительной точностью осуществлять экстраполяцию коэффициента вязкости далеко за пределы опорного участка. Показано, что рассчитанные по уравнению (1) значения вязкости кислорода согласуются с наиболее надежными экспериментальными и табличными данными в пределах экспериментальных погрешностей. Погрешность возрастает в области высоких температур и высоких давлений, критической области. Результаты расчета коэффициента вязкости кислорода с помощью предложенного уравнения приведены на рис. 1.

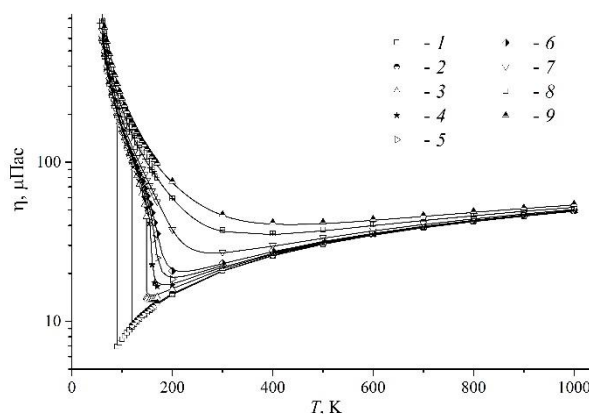


Рис. 1. Сопоставление рассчитанных значений вязкости кислорода (линии) с табличными данными (символы) на изобарах: 0,1(1); 1(2); 4(3); 6(4); 8(5); 10(6); 20(7); 40(8); 60(9) МПа

### Список литературы:

1. Каплун А.Б. Единое уравнение для коэффициента вязкости жидкости и газа// ТВТ.1989. Т. 27, №5. С. 884–888.
2. Каплун А.Б., Мешалкин А.Б., Дугова О.С. Единое малопараметрическое уравнение для расчета коэффициента вязкости аргона// Теплофизика и Аэромеханика. 2017. Т.24. №2. С. 209–219.
3. Lemmon E.W., McLinden M.O. and Huber M.L. 2002 Nist Standart Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties- REFPROP Version 8.0 Standart Reference Data Program, Gaithersburg, United States: National Institute of Standards and Technology.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН 121031800219-2.

УДК 621.039.5

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ДВУХФАЗНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО ПОТОКА ПРИ МАЛОМ УВЕЛИЧЕНИИ СЕЧЕНИЯ ПЛОСКОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО КАНАЛА

Евдокименко И.А.<sup>1,2</sup>, Лобанов П.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Университет Нанта, 44035, Франция, Нант, Набережная Турвиль 1

Для оптимизации и повышения производительности энергоэффективного оборудования требуется комплексный набор информации о механизмах явлений переноса тепла и массы, как в однофазных, так и в многофазных системах. Известно, что явления переноса тесно связаны с гидродинамической структурой потока. И возможность управления такой структурой является ключом к успешному использованию действующих энергетических установок, а также к созданию высокоэнергоэффективных аппаратов нового поколения.

Одним из пассивных способов влияния на гидродинамическую картину течения является изменения геометрии канала, путем введения пассивных завихрителей и турбулизаторов потока [1, 2]. К таким устройствам можно отнести плоскую ступень или каскад таких ступеней, ведущих к расширению канала и сепарации потока.

Основными направлениями, в которых активно развиваются двухфазные отрывные течения являются атомная и биоэнергетика.

Однако, несмотря на актуальность данной тематики, количество работ по исследованию таких течений ограничено, и ряд вопросов о механизме отрыва потока и о его последствиях до сих пор остаётся открытым.

Данная работа посвящена исследованию динамики жидкой и газовой фаз с помощью современных оптических методов (PIV/PFBI, PLIF) в газожидкостном пузырьковом потоке за внезапным ступенчатым расширением вертикального канала. Экспериментальный стенд представляет собой прямоугольный оргстеклянный канал с геометрическими размерами 200×1000×20 мм. Для создания ступенчатого расширения в канал была установлена плоская оргстеклянная ставка с размерами 200×6004 мм. Таким образом, высота ступени  $H$  составляет 4 мм, высота канала до и после расширения равна 16 и 20 мм соответственно. Эксперименты проводились в диапазоне чисел Рейнольдса до 8000 при постоянном расходе газа 1000 мл/мин. Дополнительные эксперименты проведены в однофазном потоке при том же расходе жидкости. Температура жидкости в потоке равна 24,9–25,1 °С.

При проведении оптических измерений лазерный нож был расположен параллельно уступу. Данная конфигурация позволяет определить закономерности распределения профилей скорости как для различных расстояний от ступеньки, так и по ширине канала.

Для получения данных о распределении газовой фазы за ступенькой использовался алгоритм машинного зрения. Этот алгоритм позволяет отслеживать

траекторию каждого пузырька при движении за расширением.

В работе [3] было показано, что при наличии расширения с высотой 8 мм, структура течения за уступом неоднородна, о чём свидетельствует наличие различных завихрений как в центральной, так и в периферийных областях.

Целью данной работы является изучения влияния уменьшения степени расширения на гидродинамические характеристики двухфазного пузырькового течения.

Были получены данные по распределению скорости жидкой фазы в канале по поперечному сечению канала. Показано, что за уступом существует зона возвратного течения. При удалении от уступа наблюдается выравнивание профиля скорости. Полученные данные хорошо совпадают с результатами численного моделирования, проведёнными в ИТ СО РАН.

Также были получены поля скорости жидкости на расстоянии 0–14Н от уступа. Стоит отметить, что при вводе пузырей в канал наблюдается уменьшение длины зоны рециркуляции. Тем самым, точка присоединения однофазного потока располагается на расстоянии 4–5Н от уступа, в то время как, для двухфазного потока эта точка располагается на расстоянии 2–3Н.

Локальное содержание газа увеличивается при удалении от расширения. По-видимому, это обусловлено замедлением пузырьков и их взаимодействием с вихревыми структурами, а также возвратным потоком у нижней стенки канала.

В результате получены данные о гидродинамической структуре течения в двухфазном отрывном потоке, которые могут быть использованы для верификации CFD кодов.

### Список литературы:

1. Schmidt J., and L. Friedel, Two-Phase Flow Pressure Change Across Sudden Expansions in Duct Areas Chemical Engineering Communications Vol.141–142, 1996, pp. 175–190.
2. Aloui F., and Souhar M., 1996. Experimental Study of a Two-Phase Bubbly Flow in a Flat Duct Symmetric Sudden Expansion—Part 1: Visualization, Pressure and Void Fraction, International Journal of Multiphase Flow, Vol.22, 1996, pp. 651–65.
3. Bogatko, T.V., Chinak, A.V., Evdokimenko, I.A., Kulikov, D.V., Lobanov, P.D., Pakhomov, M.A., 2021. The effect of a backward-facing step on flow and heat transfer in a polydispersed upward bubbly duct flow. Water 13, 2318.

*Работа поддержана государственным контрактом Российской Федерации с Институтом Теплофизики СО РАН (121032200034-4).*

УДК 621.311.22

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТЬ ПРОБЫ ПРИ ОТБОРЕ ПАРА РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ПРОБООТБОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Егошина О.В., Звонарева С.К.

Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт»,  
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14  
sofi.zvonareva@yandex.ru

Чистота пара определяется растворимостью солей в паре и механическим уносом капель влаги потока пара. Растворимость веществ в паре имеет ряд особенностей. Во-первых, вещества в паре растворяются избирательно. При идентичных условиях растворимость в паре различных соединений неодинакова. Во-вторых, растворяющая способность пара с повышением давления увеличивается. С ростом давления рабочей среды концентрация примесей в паре увеличивается. Известно, что на чистоту пара существенно влияет повышение растворимости, в первую очередь, кремниевой кислоты, а затем солей натрия, гидроксида меди и железа [1]. Необходимо отметить, что одной из основных причин нарушений работы энергооборудования, приводящих к поломке работы оборудования и иногда к останову блока, является именно образование отложений продуктов коррозии. По данным проведенного исследования [2], наибольшее количество отложений продуктов коррозии происходит на первых метрах после отбора пробы и максимальная погрешность при определении концентрации продуктов коррозии вследствие потерь в пробоотборной системе достигает 50%. Так как перегретый пар по продуктам коррозии является насыщенным раствором, достаточно небольшого скачка температуры и давления, чтобы пар стал пересыщенным и из него начался процесс выделения твердой фазы, частично осаждающей на стенках [3]. Следовательно, когда фактическая концентрация продуктов коррозии в паровом растворе выше значений их растворимости, происходит процесс выделения твердой фазы из перегретого пара. Таким образом, данная работа нацелена на исследование состояния продуктов коррозии в рабочей среде при отборе пара однофазным пробоотборным устройством.

При постоянной температуре растворимость веществ в перегретом паре связана с его плотностью. Согласно литературным данным [4] обобщенное уравнение растворимости (1) записывается следующим образом:

$$\lg C_{\text{п}} = m \lg \rho_{\text{п}} - (\Delta H / 2,3RT) + B \quad (1)$$

где  $C_{\text{п}}$  - равновесная концентрация примесей в паре, моль/кг;  $\rho_{\text{п}}$  - плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  - координационное число;  $R$  - газовая постоянная;  $\Delta H$  - тепловой эффект процесса растворения;  $T$  - температура пара, К;  $B$  - постоянная интегрирования.

Значения  $m$ ,  $\Delta H$ ,  $B$  находятся индивидуально для каждого вещества при различных параметрах среды, так, как при температурах от 200 до 500°C наиболее устойчивой формой существования продуктов коррозии является магнетит, для исследования выбрана данная форма существования продуктов коррозии железа.

Согласно [5] уравнение растворимости магнетита (2) для интервала плотности от 10 до 200 кг/м<sup>3</sup>:  $m = 0,6$ ,  $\Delta H = -3050$ ,  $B = -7,15$  представлено ниже:

$$\lg S_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = 0,6 \lg \left( \frac{\rho_{\text{п}}}{1000} \right) + 3050 / 4,57T - 7,15 \quad (2)$$

Отбор проб насыщенного и перегретого пара является сложным процессом, который требует соблюдения многих условий: выбор и правильная установка пробоотборного устройства, согласно руководящему документу [6], поддержание условия изокINETИЧНОСТИ (равенство скоростей потока в основном паропроводе и в пробоотборном устройстве), отсутствие резких скачков давления и температуры отбираемой пробы. Так как на растворимость примесей влияет в большей степени давление и температура среды (принято, что в рассматриваемом случае температура постоянна), с помощью программного комплекса Ansys CFX смоделирован процесс отбора пробы перегретого пара однофазным пробоотборным устройством и отбор пробы врезкой трубы под 90°. Получены выходные данные по максимальному и минимальному значению давления в пробоотборном устройстве при постоянной температуре. С помощью уравнения (2) рассмотрено изменение растворимости магнетита для котлов среднего давления при постоянной температуре. На основе анализа результатов показано, что при использовании типового пробоотборного устройства для отбора пробы перегретого пара скачки давления влияют на представительность пробы незначительно – растворимость магнетита изменяется в допустимых пределах (не превышает  $3 \cdot 10^{-7}$  мкг/кг) применительно к котлам среднего давления. Однако при отборе пробы врезкой трубы из-за сильных скачков давления, происходит процесс выделения твердой фазы из перегретого пара, что приводит к заниженным результатам по продуктам коррозии – проба не представительна.

## Список литературы:

1. Двоишишников В.А. Конструкция и расчет котлов и котельных установок, 1988.
2. Воронов В.Н. Водно-химические режимы ТЭС//МЭИ, 2009.
3. Котельные установки электростанций/ М. И. Резников, Ю. М. Липов. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 288 с.
4. Кемельман Д. Н., Костинская Н. В., Рябова Г. Н. Об отборе пробы влажного пара. – «Электрические станции», 1964, №7.
3. РД 24.031.121-2012 Методические указания Оснащение паровых стационарных котлов устройствами для отбора проб пара и воды.
5. On-line analytical systems for the next millennium / Fahlke J., Fichte W., Maughan E., Pflug H., Seipp H.-G., Staudt U. // 6-th International conference on fossil plant cycle chemistry. 2000. Columbus. USA.

УДК 621.311

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИЗИСА КИПЕНИЯ ВОДНО-СОЛЕВЫХ РАСТВОРОВ ВНУТРИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Елистратов С.Л., Миронова Н.В.

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

Для разработки перспективных абсорбционных термотрансформаторов (АТТ) периодического действия важное значение имеет процесс испарения водно-солевых растворов в генераторе, стенки которого имеют температуру  $T_{CT}$ , превышающую температуру Лейденфроста  $T_L$  ( $T_{CT} > T_L$ ). В опытах с каплями растворов [1] показано, что в отличие от чистых жидкостей кризис теплообмена вырождается при достижении определенной средней весовой концентрации раствора  $\xi = m_c/m_p$ , где  $m_c$  и  $m_p$  – соответственно массы соли и раствора. Для анализа причин этого явления (см. рис. 1) рассматривается теплоотдача от поверхности нагрева к объему раствора высотой  $\delta$  и диаметром  $D$  через тонкий сплошной слой пара  $\delta''$  при условии, что на боковой и нижней поверхностях раствора температура равна температуре насыщенного пара  $T''$ . В предположении ламинарного характера течения в слое  $\delta''$  уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\frac{\lambda''}{\delta''} + \alpha_p = \frac{r \cdot \rho' + c \cdot \rho' (T'' - \bar{T})}{(T_{CT} - T'') \left(1 + \frac{4\delta}{D}\right)} \cdot \frac{d\delta}{dt}, \quad (1)$$

где  $\lambda''$  и  $\alpha_p$ ,  $r$ ,  $\rho'$ ,  $c$  и  $\bar{T}$  – соответственно коэффициенты теплопроводности пара и радиационной теплоотдачи, удельная теплота испарения, плотность, удельная теплоемкость и средняя температура раствора.

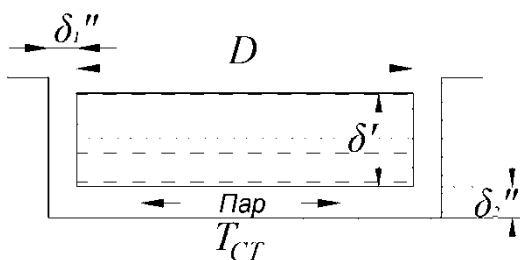


Рис. 1. Схема задачи об испарении объема водно-солевого раствора внутри вертикального цилиндрического нагревателя при  $T_{CT} > T_L$ .

Пар выходит по периферии под влиянием избыточного давления  $\Delta p$ , определяемого весом жидкости и трением при движении пара в зазоре между раствором и стенками нагревателя:

$$\Delta p = g \cdot \delta (\rho' - \rho'') + \Delta p_{K3}, \quad (2)$$

где  $\Delta p_{K3}$  – перепад давления при движении пара в кольцевом зазоре толщиной  $\delta_2''$ .

Элементарный массовый расход пара на выходе:

$$dG'' = \zeta \pi \delta'' (D \delta'' + (\delta'')^2) \rho'' \sqrt{\frac{2(g\delta(\rho' - \rho'') + \Delta p_{K3})}{\rho''}} dt, \quad (3)$$

где  $\zeta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий изменение геометрии движения потока пара.

Величина  $dG''/dt$  может быть определена из материального баланса раствора в процессе десорбции:

$$dG'' = dV \cdot \rho' = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho' \cdot d\delta. \quad (4)$$

Совмещение (3) и (4) дает выражение для определения средней толщины слоя пара:

$$\zeta \pi \delta'' (D \delta'' + (\delta'')^2) \rho'' \sqrt{\frac{2(g\delta(\rho' - \rho'') + \Delta p_{K3})}{\rho''}} dt = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \rho' d\delta \quad (5)$$

Его частным решением [2] является толщина слоя пара под плоским сфероидом чистой ( $\xi = 0$ ) жидкости:

$$\delta_1'' = \frac{1}{\sqrt[3]{32}} \sqrt{\frac{\lambda'' (T_{CT} - T'') D}{r(1 + c(T'' - \bar{T})/r)}} \sqrt[4]{g \cdot \delta \cdot \rho' \cdot \rho''} \quad (6)$$

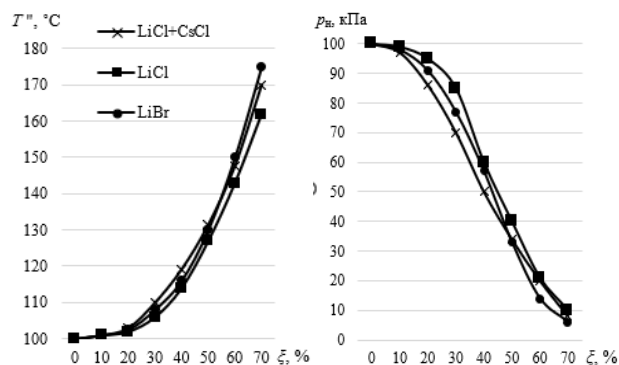


Рис. 2. Зависимости температуры кипения раствора и давления насыщенного пара над водными растворами от массовой концентрации соли.

Анализ полученных на основании (5) решений показал сильную зависимость процесса от концентрации раствора. С ее ростом резко снижается давление насыщенных паров и увеличивается температура кипения (см. рис. 2) что приводит к уменьшению толщины парового слоя до предельно малой величины, при которой происходит контактирование раствора с поверхностью нагрева (вырождение кризиса теплообмена). Также определяющее значение имеет медленный характер диффузии в поверхностном слое раствора, приводящий к локальному пересыщению раствора и выделению твердой фазы.

Список литературы:

1. Nakoryakov V.E. Experimental investigation of the nonstationary desorption of water-salt solutions in the spheroidal state / V.E. Nakoryakov and S.L. Elistratov // Journal of Engineering Thermophysics. - 2009. - Vol. 18, № 2. - P. 87–92.
2. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

## О ФИЗИЧЕСКОЙ СУТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СРЕД

Жеребятъев В.И.

**Исходные положения.** При нагревании твердых тел, жидкостей и газов поглощается энергия. Положим, что энергия, перешедшая от нагревания, переходит к электронам и изменяет их электрический заряд. Обозначим получившуюся от нагревания часть заряда электрона через  $e_s(T)$ , где  $T$  – абсолютная температура, и будем называть ее «остаточным электрическим зарядом электрона».

Будем считать остаточный электрический заряд электронов в структурной единице (атоме или молекуле) одинаковыми для всех электронов. В этом случае остаточный электрический заряд структурной единицы будет равным  $\varepsilon Ze_s(T)$ , где  $Z$  – зарядовое число структурной единицы,  $\varepsilon$  – некоторый коэффициент, учитывающий состав исследуемой среды. Отметим эквивалентность энергии электрона и объема занимаемого им в пространстве [1, 2, 3]. Таким образом полученная от нагревания среды энергия не что иное, как сумма объемов остаточных электрических зарядов ее электронов. Обозначим через  $Q_{об}$  количество энергии в объеме среды равном  $1 \text{ м}^3$ .

**Теплопроводность.** В этих предположениях в части теплопроводности  $\lambda$ , согласно электростатики, из того, что работа по перемещению заряда  $Q_{об}$  в пространстве на  $1 \text{ м}$  равна  $Q_{об}$ , справедливо следующее утверждение:

$$Q_{об} = \lambda q, \quad (1)$$

где  $q = \varepsilon n Ze_s(T)$ ,  $n$  – концентрация структурных единиц.

Это соотношение справедливо для любых структурных объектов.

**Теплопроводность газов.** Для газов близких к идеальным при справедливости закона Авогадро можно обойтись без знания  $e_s(T)$ . В этом случае формула для вычисления теплопроводности имеет вид

$$\lambda = \varepsilon / Z, \quad (2)$$

где  $\varepsilon = 0.312$  для одноатомных молекул;  $\varepsilon = 0.366$  для молекул, состоящих из нескольких атомов при  $Z < 30$ . Полученный результат избавляет от необходимости экспериментального определения теплопроводности для большинства газов. Достаточно найти теплопроводность для одного из газов этой группы и рассчитать теплопроводность ее для других по формуле (2).

Сравнение результатов расчетов по формуле (2) с теплоемкостями газов из справочника [4] и ряда других справочников показывает, что оно в общем плане

соответствует экспериментальным данным с точностью до разброса значений представленных в опубликованных справочных материалах. Обращают на себя экспериментальные данные по неону, азоту и кислороду. Похоже, что при представлении экспериментальных данных экспериментаторами значения по азоту и кислороду перепутаны местами, и эта ошибка тиражируется в справочных материалах. Отличие экспериментального значения для Ne от расчетного значения вернее всего связано с ошибками экспериментирования.

Изменение теплопроводности в связи с изменением температуры связанное с изменением количества атомов в  $1 \text{ м}^3$  определяется через коэффициент объемного сжатия  $\gamma$ . В предположении, что зависимость приращения теплопроводности  $\delta\lambda(T)$  от температуры линейна в районе температуры  $T_0$  при которой требуется вычислить теплопроводность, имеет вид

$$\delta\lambda(T) = 30\gamma(T - T_0)/Z. \quad (3)$$

Проверка этого соотношения в диапазоне температур от 200 К до 400 К при  $T_0 = 300 \text{ К}$  показала, что ошибка не превышает разброса значений приведенных в справочниках.

**Заключение.** Полученные результаты позволяют утверждать, что существующее представление об отсутствии электрических зарядов у атомов неверно. В нашем мире всякий структурный объект состоит из атомов и электронов и, следовательно, имеет «остаточный электрический заряд». Величина остаточного электрического заряда в нормальных условиях, как показано в работах [1,2] находится в пределах  $e_s(T)/e = (10^{-18} - 10^{-22})$ , где  $e$  – заряд электрона. Теплопроводность не что иное, как удельное сопротивление электрическому току остаточных зарядов.

## Список литературы

1. Физика. (Новый взгляд), Жеребятъев В.И.; Типография НИИРП, Москва, Ленинградский проспект, 80, 2000г.
2. Физика. Новый взгляд. Единая модель природы. Глобальные угрозы жизни на Земле со стороны космоса; Жеребятъев В.И.; М.О., Химки, мкр. Новогорск.: Типография АГЗ МЧС России, 2011г.
3. Жеребятъев В.И.; О сути энергии.- В сборнике: Актуальные вопросы естествознания. Сборник материалов III научно-практической конференции с международным участием. Сост.: Н.Е. Егорова;–Иваново, ИПСА, 2018, с. 48-50.
4. Физические величины.- Справочник под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова: М., Энергоатомиздат, 1991 г.



УДК 621.9

## СРАВНЕНИЕ РАСПАДА ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУИ ЖИДКОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЧИСЕЛ РЕЙНОЛЬДСА

Жерибор М.О., Хребтов М.Ю.

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

Одним из методов улучшения характеристик горения топлива является атомизация, то есть распыл жидкой струи.

Распад струи – сложный процесс, теоретическое описание данного явления затруднено из-за взаимодействия различных неустойчивостей (Релея-Плато, Кельвина-Гельмгольца, Релея-Тейлора).

В данной работе было проведено моделирование жидкой струи из центробежной форсунки методом VOF (volume of fluid). Расчётная сетка динамически сгущалась методом adapt wavelet на границах твердого тела, межфазных границах и в зонах высокого градиента скорости. За основу для расчетов был взят вычислительный код Basilisk [1]. Данный расчетный пакет обладает готовыми инструментами для работы методом VOF, но отсутствует реализация задания произвольных границ твердого тела.

Для задания границы твердого тела необходимо ввести функцию, изоповерхность которой будет являться поверхностью этого твердого тела. В качестве такой функции была выбрана функции расстояния до 3D модели твердого тела. Для построения такой функции расстояния за основу был взят алгоритм [2], переработанный для увеличения скорости вычислений. Помимо модуля расстояния, было также важно получить его знак, отделяющий области внутри тела от областей снаружи. Он рассчитывался при помощи введения обобщенной нормали [3].

В качестве модельной задачи была выбрана центробежная форсунка. Она состоит из двух входных каналов диаметром 1,2 мм, входящих в внутреннюю цилиндрическую камеру диаметром 3,4 мм с двух противоположных сторон. Внутренняя камера заканчивается выходным соплом диаметром 0,8 мм. В качестве распыляемой жидкости использовался керосин с плотностью  $810 \text{ кг/м}^3$ , истекающий в воздух, находящийся при температуре 300К и давлении 1 атм (плотность воздуха задавалась равной  $1,2 \text{ кг/м}^3$ ). Поверхностное натяжение керосина задавалось равным  $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ . Расход керосина был равен 0,68 л/мин, что соответствовало выходной скорости истечения 22,5 м/с. Были рассмотрены два случая, один случай с повышенной в 10 раз вязкостью и воздуха, и керосина и второй случай с реалистичной вязкостью. Для случая с повышенной вязкостью число Рейнольдса было равно 1000, а для случая с реалистичной вязкостью оно было равно 10000. Число Вебера для обоих случаев равнялось 3. При помощи оценки колмогоровского масштаба, были получены оценочные значения для минимального шага сетки в 5 микрон для  $Re=1000$  и 1 микрон для  $Re=10000$ .

В результате расчетов были получены распределения средних скоростей.

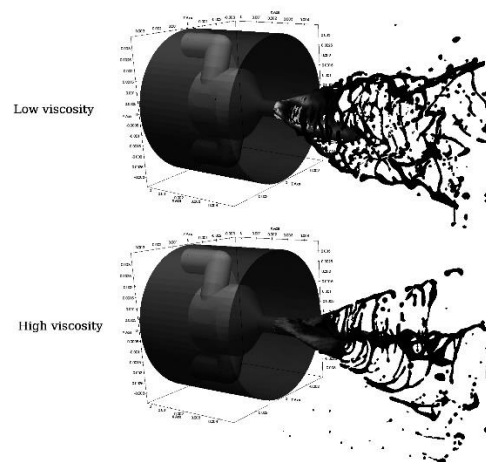


Рис. 1. Распад вылетающей из центробежной форсунки струи.

В распределениях продольной скорости видно, что для случая большой вязкости помимо основного конуса присутствует еще центральная струя, уносящая часть жидкой фазы. В случае малой вязкости вся исходная струя распространяется в виде конуса, в котором присутствуют значительные пульсации, вызванные развитием различного типа неустойчивостей.

В распределениях продольных пульсаций скорости видно, что для случая большой вязкости пульсации сосредоточены в области максимальной концентрации жидкой фазы и связаны с процессами распада жидкой пленки. В случае с большой вязкостью в продольных пульсациях виден максимум на внутренней стороне слоя смешения рядом с выходом из сопла.

В распределении радиальных и окружных пульсаций помимо описанных выше максимумов особенностью является наличие максимума внутри сопла и на выходе из него в области оси. Данный максимум связан с воздействием пузырьков, находящихся вблизи оси сопла. Воздействие данного эффекта может существенно турбулизовать поток на выходе из сопла и приводить к интенсификации процессов распада в жидкости.

### Список литературы:

1. Zhang B., Popinet S., Ling Y. Modeling and detailed numerical simulation of the primary breakup of a gasoline surrogate jet under non-evaporative operating conditions //International Journal of Multiphase Flow. – 2020. – Т. 130. – С. 103362.
2. Jones M. W. 3D distance from a point to a triangle //Department of Computer Science, University of Wales Swansea Technical Report CSR-5. – 1995.
3. Bærentzen J. A., Aanaes H. Signed distance computation using the angle weighted pseudonormal //IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2005. – Т. 11. – №. 3. – С. 243-253.

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН.

УДК 536.2

## ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВО ФРЕОНЕ R21 И СМЕСИ ФРЕОНОВ R114/R21

Жуков В.Е., Мезенцева Н.Н., Павленко А.Н.

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

Применение смесей в качестве хладагентов и теплоносителей в различных энергетических системах приобрело широкое распространение [1,2]. Смесей имеют теплофизические свойства, отличные от свойств отдельных компонентов. Особое внимание следует уделить процессу парообразования в азеотропных и неазеотропных смесях. В азеотропных бинарных смесях коэффициент летучести одинаков для обеих компонент, в то время как в неазеотропных он существенно различается. Легколетучая компонента в условиях значительной неравновесности процесса может привести к инициации парообразования при меньших температурных напорах. Широкое распространение различных технологий модификации теплоотдающей поверхности (ТП) с целью повышения эффективности теплоотдачи наблюдается в последние десятилетия. Ряд технологий предусматривают создание микрокапиллярных и пористых структур покрытия ТП, например аддитивные технологии (3d печать) [3].

В данной работе приведены результаты исследования теплообмена при кипении фреона R21 и смеси фреонов R114/R21 на плоской ТП, модифицированной медным покрытием с использованием 3d печати. Эксперименты проводились на 2 рабочих участках, детали которых были изготовлены на станках с ЧПУ. Теплоотдающий блок рабочего участка изготовлен из латуни ЛС59 прямоугольной формы размером 16×24 мм и толщиной 3 мм. На расстоянии 1 мм от поверхности теплоотдачи в теле блока установлены 3 полупроводниковых термометра диаметром 1.2 мм и длиной 2.5 мм. Теплоотдающий блок установлен на блоке нагревателя с 4 элементами объемного тепловыделения. Теплоизоляция рабочего участка обеспечена массивным корпусом из стеклотекстолита.

В данной работе представлены результаты экспериментов на 2 ТП, из которых ТП-1 с шероховатостью  $R_z=1.25$  не имела покрытия, а ТП-3 была модифицирована посредством аддитивных технологий с использованием бронзовых сферических гранул среднего диаметра 35 мкм посредством лазерного сваривания гранул. Пористость покрытия составляла 45–50%, толщина покрытия изменялась по синусоидальному закону с периодом 1500 мкм. ТП-3 имела толщину остаточного слоя 150 мкм, а толщину в гребнях 700 мкм. Гребни модифицирующего покрытия ориентированы вдоль короткой стороны ТП.

Эксперименты проводились на горизонтальной ТП в условиях большого объема при температуре  $21 \pm 1.5^\circ\text{C}$ , что соответствовало давлению 0.15–0.17 МПа для фреона R21, и давлению 0.17–0.19 МПа для смеси фреонов R114/R21. Плотность теплового потока изменялась в диапазоне 80–425000 Вт/см<sup>2</sup>. Результаты экспериментов представлены на диаграмме (см. рис. 1) в виде зависимости  $q(\Delta T)$ .

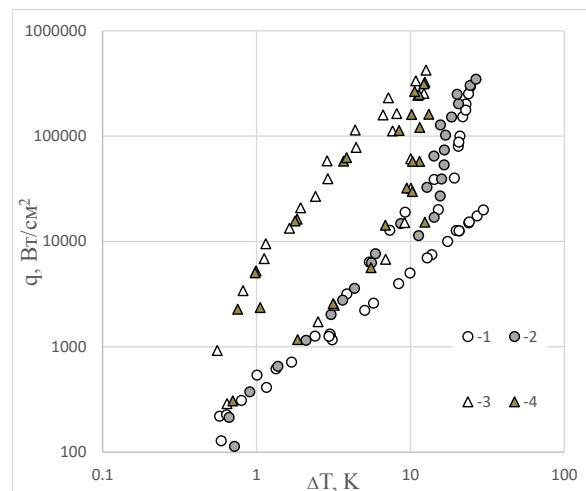


Рис. 1. Зависимость  $q(\Delta T)$  для не модифицированной и модифицированной ТП при кипении во фреоне и смеси R114/R21. 1 – ТП-1, фреон; 2 – ТП-1, смесь; 3 – ТП-3, фреон; 4 – ТП-3, смесь.

На не модифицированной поверхности во фреоне R21 закипание начинается при достижении значительного температурного напора ( $\Delta T=30\text{ K}$ ). Образование паровой фазы сопровождается двукратным снижением температурного напора. На смеси начало кипения наблюдается при достижении температурного напора начала кипения ( $\Delta T_{\text{нк}}=15\text{ K}$ ). Таким образом на не модифицированной ТП с низкой шероховатостью наличие легколетучей компоненты способствует снижению метастабильности теплового слоя.

На модифицированной ТП закипание начинается при  $\Delta T_{\text{нк}}=10\text{--}12\text{ K}$  как на фреоне R21, так и на смеси фреонов. В области развитого кипения интенсивность теплоотдачи на модифицированной ТП существенно (в 3–5 раз) выше, чем на не модифицированной поверхности, как на фреоне R21, так и на смеси фреонов.

### Список литературы:

1. Бабакин Б.С., Стефанчук В.И., Ковтунов Е.Е. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе. М.: Колос. 2000. 160 с.
2. Цветков О.Б. Современные хладагенты, хладоносители и проблемы экологии // Холодильная техника. 2008. №1. С. 30–34.
3. Баев С.Г., Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Горяев Е.П., Кастеров В.В., Смирнов К.К. Лазерная система для исследования аддитивного формообразования изделий из металлических порошков // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 5. № 1. С. 29–34.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН в рамках государственного задания ИТ СО РАН проект № 121031800216-1.

УДК 536.24

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Зайнуллина Э.Р., Митяков В.Ю.

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

Эксперименты по изучению теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на вертикальной и наклонной трубе [1], выполненные с применением градиентной теплотометрии [2], подтвердили применимость градиентных датчиков теплового потока (ГДТП).

Представленная работы посвящена изучению теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на поверхности горизонтальной трубы (рис. 1) с применением градиентной теплотометрии и термометрии. На образующей медной трубы ( $d=18$  мм;  $\delta=1$  мм) установлены ГДТП из монокристаллического висмута размерами  $3 \times 3 \times 0,3$  мм с вольт-ваттной чувствительностью  $S_0=2,81$  мВ/Вт и термопара из композиции медь-алюмель. В межтрубное пространство подается насыщенный водяной пар с температурой  $t_s \approx 100^\circ\text{C}$ , в медную трубу – охлаждающая вода.

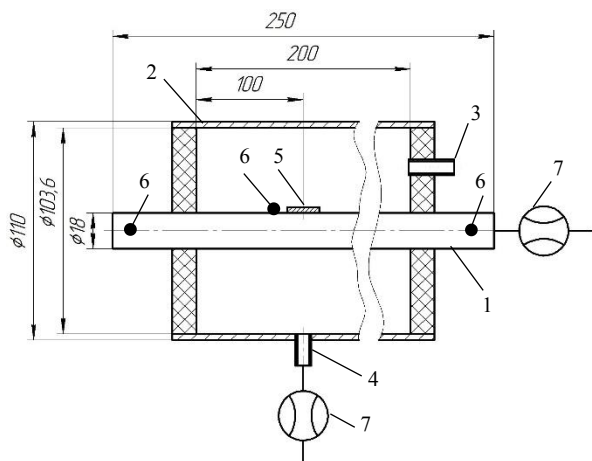


Рис. 1. Схема измерительного участка: 1 – медная труба; 2 – пластиковый кожух; 3 и 4 – штуцер для подвода пара и отвода конденсата; 5 – ГДТП; 6 – термопара; 7 – расходомер.

Первая серия опытов выполнена при расположении ГДТП и термопар на верхней образующей трубы ( $\varphi=0$  – азимутальный угол), где толщина конденсатной плёнки минимальна и отсутствует волнообразование на её поверхности [3]. На рис. 2 представлена временная теплограмма, построенная по показаниям ГДТП при температурном напоре  $\Delta t=t_s-t_w=22$  К, где  $t_w$  – температура стенки трубы в месте установки датчика. Пульсации плотности теплового потока (рис. 2) связаны с образованием, объединением и стеканием конденсата с верхней образующей трубы.

Совмещение возможностей теплотометрии и термометрии позволило оценить зависимость местного коэффициента теплоотдачи (КТО) от температурного напора (рис. 3).

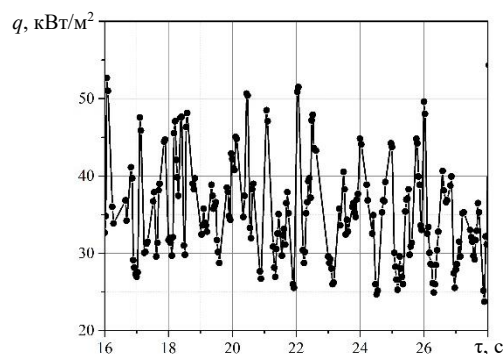


Рис. 2. Временная теплограмма при конденсации на горизонтальной трубе ( $\varphi=0$ ;  $\Delta t=22$  К).

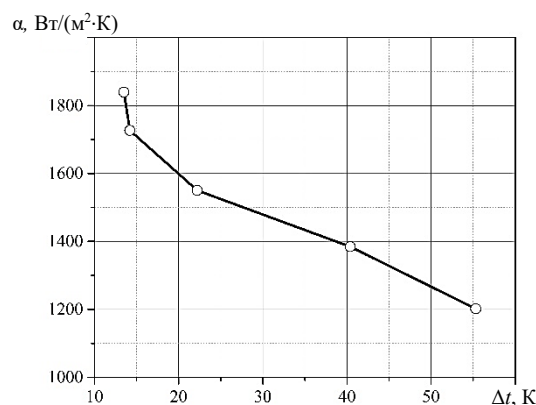


Рис. 3. Зависимость местного КТО от температурного напора.

Выявлена существенная нестационарность теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на верхней образующей горизонтальной трубы. Предлагаемый подход будет применен к изучению распределений плотности теплового потока и КТО по периметру поверхности теплообмена.

### Список литературы:

1. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Бабич А.Ю., Зайнуллина Э.Р. Изучение пленочной конденсации насыщенного водяного пара на поверхностях труб методом градиентной теплотометрии // Теплоэнергетика. 2021. № 10. С. 73-81.
2. Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement / S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov // Switzerland Springer Cham, 2020. P. 209.
4. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учебное пособие для вузов / В.В. Ягов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 542 с.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 22-29-00152.

УДК 533.6.011

## ГОРЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ С $M=1.7$ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ТЕПЛОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСАМИ

Замураев В.П.<sup>1,2</sup>, Калинина А.П.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Управление организацией и процессом горения в сверхзвуковом потоке продолжает привлекать внимание исследователей. Численное моделирование - это альтернатива для дорогостоящего эксперимента. В [1] показан способ организации горения в сверхзвуковом потоке с минимальными потерями полного давления при горении керосина. Керосин подается аксиально в начале секции постоянного сечения канала с внезапным расширением, ниже по потоку через щель в стенке канала перпендикулярно потоку подается сжатый воздух в импульсно-периодическом режиме, что в дальнейшем именуется «теплогазодинамическими импульсами». Для данного способа организации горения в сверхзвуковом потоке возникает задача о выборе оптимальных параметров. Влияние температуры сжатого воздуха в диапазоне 300 К – 1000 К априори предполагается незначительным, так как инициирует горение ударная волна от струи сжатого воздуха, а сам воздух, подаваемый с боковой стенки, не контактирует с топливом, подаваемым аксиально. Выполнено сравнение результатов для температур сжатого воздуха 300 К и 800 К. Постановка задачи аналогична [2]: численно решаются нестационарные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса,  $k-\epsilon$  Realizable модель турбулентности, упрощенная химическая кинетика. Для температуры сжатого воздуха, равной 300 К, числа Маха потока в секции постоянного сечения  $M \approx 1.7$  выполнено сравнение осредненного по времени давления вдоль стенки канала для стадии инициирования горения.

Как видно из рис. 1, наблюдается удовлетворительное совпадение эксперимента [1] и расчета. Для температуры торможения сжатого воздуха 800 К с точным совпадением всех остальных условий предыдущего расчета, результаты которого изображены на рис. 1, также выполнено численное моделирование организации горения в сверхзвуковом потоке. На рис. 2 приведено сравнение временной динамики координаты возмущения, распространяющегося вверх по потоку в результате инициирования горения, для температур торможения сжатого воздуха  $T=300$  К и  $T=800$  К. Отличия незначительны.

Таким образом, температура сжатого воздуха при дросселировании и аксиальной подаче топлива оказывает слабое влияние на процесс инициирования горения, который развивается выше по потоку от места подачи сжатого воздуха. Основные отличия наблюдаются ниже по потоку. Более значительное влияние температура сжатого воздуха будет оказывать на горение топлива, подаваемого ниже по потоку от сечения дросселирования канала.

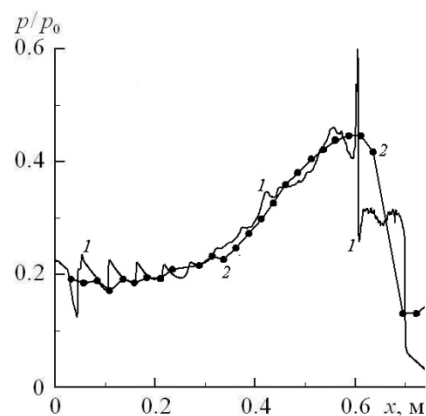


Рис. 1. Распределение отношения статического давления на стенке канала к давлению торможения потока на стадии зажигания.

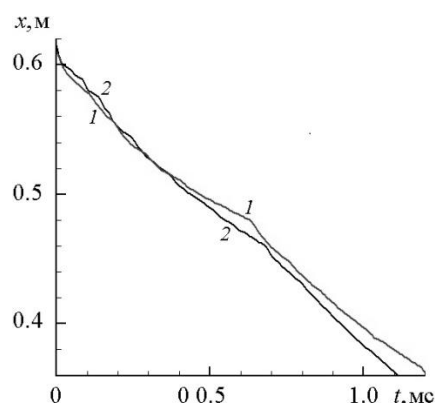


Рис. 2. Зависимость координаты ударной волны по оси канала от времени при подаче воздуха с подогревом до  $T = 800$  К: (кривая 1) и без подогрева  $T = 300$  К (кривая 2).

### Список литературы:

1. Третьяков П. К., Тупикин А. В. Режимы горения керосина в канале постоянного сечения при числе Маха  $M=1.7$  на входе // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения. Сб. тезисов XI Всерос. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 9–12 ноября 2021 г. – Новосибирск, ИТ СО РАН. – 135-135 с.
2. Zamuraev V.P., Kalinina A.P. Deceleration of a supersonic flow down to transonic speeds using gas-dynamic pulses during combustion of hydrocarbon fuels // AIP Conference Proceedings : XX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR – 2020) (Novosibirsk, 1–7 Nov. 2020). -Vol.2351, No.1. - S.l.: AIP Publishing, 2021. -030050(6) p. DOI: 10.1063/5.0052907.

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 (проект № 121030500157-3) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 20-08-00245).*

УДК 621.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОГО АЗОТА НА ПОВЕРХНОСТИ ВТСП ЛЕНТ

Занегин С.Ю., Зубко В.В., Иванов Н.С., Ковалев К.Л.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
125993, Россия, Москва, Волоколамское ш, 4  
zaneginsy@mai.ru

Особенности поведения ВТСП-лент, охлаждаемых жидким азотом, при ступенчатых импульсах тока с амплитудой выше критического тока (при токах перегрузки), в работе [1] были объяснены не только нелинейными свойствами сверхпроводника, но и явлением гистерезиса пузырькового кипения (NB) жидкого азота. В жидкостях, таких как азот, существует гистерезис NB, который означает задержку начала NB при увеличении теплового потока или увеличением перегрева нагревателя при переходе от конвекции к пузырьковому кипению. Общепринятый подход при изучении гистерезиса NB, как и в других случаях теплообмена при кипении – анализ кривых кипения.

В работе [2] мы исследовали гистерезис NB с помощью анализа экспериментальных кривых напряжения и температуры от времени, полученных на ВТСП-лентах при ступенчатых импульсах тока выше критического тока. Для анализа поведения ВТСП лент, при токах перегрузки, охлаждаемых азотом, была разработана численная модель, основанная на использовании сопряженных дифференциальных уравнений, описывающих тепловые и электрические процессы в ВТСП-лентах с учетом нелинейной модели теплоотдачи в кипящий азот. В тепловой части модели впервые учтены особенности гистерезиса при кипении азота, а именно, что гистерезис имеется как при возникновении и прекращении развитого кипения, так и при не полностью развитом кипении. На рис. 1 показаны кривые кипения, учитывающие гистерезис.

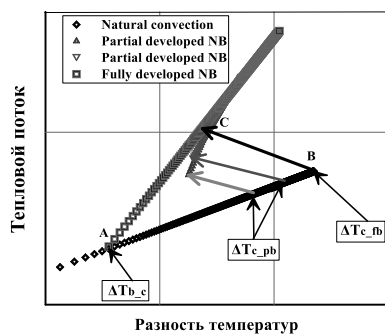


Рис. 1. Кривые кипения. Характерные температурные разности ( $\Delta T$ ) при гистерезисе кипения:  $\Delta T_{b,c}$  –  $\Delta T$  перехода от кипения к конвекции;  $\Delta T_{c,pb}$  –  $\Delta T$  для случая перехода сначала к не полностью развитому кипению;  $\Delta T_{c,nb}$  –  $\Delta T$  для случая перехода к полностью развитому кипению.

Для режима кипения коэффициент теплоотдачи моделировался выражением:

$$\alpha_b = C_b \cdot q^m \quad (1)$$

Где коэффициенты  $C_b$  и  $m$  зависят от характеристик поверхности нагреватель/жидкость и скорости нарастания плотности теплового потока. В результате исследований установлено, что пики температур на

ВТСП ленте соответствуют температуре, определяющей задержку кипения  $\Delta T_{c,pb}$ . Известно, что для полностью развитого кипения (медь/азот)  $C_b=12$  и  $m=0,624$ . Для неполностью развитого кипения коэффициенты определены из эксперимента (таблица 1) при различных токах перегрузки.

Таблица 1. Параметры для моделирования кипения азота.

Ток, А	$\Delta T_{c,pb}$	$C_b$	$m$
326	5	2	0,8
363	6	3,5	0,76
382	7	6	0,75
419	8	8	0,72
437	8,5	10	0,68
456	9	12	0,65

На рис. 2 показаны рассчитанные и измеренные зависимости напряжения от времени для различных токов перегрузки для ВТСП ленты первого поколения.

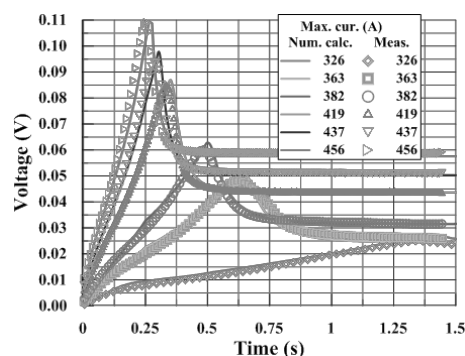


Рис. 2. Расчетные и измеренные напряжения от времени в ВТСП ленте для различных токов перегрузки.

Разработана численная модель для анализа поведения ВТСП-лент, охлаждаемых жидким азотом при перегрузках токами выше критического. Численный анализ показал, что явление гистерезиса NB зависит от величины токов перегрузки. Предложенная модель гистерезиса к NB позволила получить результаты расчетов, близкие к экспериментальным результатам. Данная модель может быть использована для оценки поведения ВТСП лент при токах перегрузки. Определены характерные параметры для описания явления гистерезиса пузырькового кипения азота.

Список литературы:

- Zubko V., Ryabov S., Fetisov S., Vysotsky V. Heat transfer simulation to liquid nitrogen from HTS tapes at the overload currents // Physics Procedia. – 2015.–Vol. 67. – P. 619-624.
- Zubko V., Fetisov S., Zanezin S., Vysotsky V., Analysis of behaviour of HTS tapes cooled by liquid nitrogen under currents more than the critical current // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, Vol. 502(1), pp. 012178.

УДК 532.529

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВ НА УРОВЕНЬ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В СТОЯЧЕЙ ВОЛНЕ В ЖИДКОСТИ ДО И ПОСЛЕ ПОДАЧИ ГАЗА

Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Кочергин А.В.

Казанский научно-исследовательский технический университет-КАИ им. А.Н.Туполева  
420000, Россия, Казань, ул. Карла Маркса, 10

Рабочие процессы в трубопроводах различных механических систем часто сопровождаются со звуковыми колебаниями. При совпадении частоты этих колебаний с собственными частотами гидравлического тракта могут возникать резонансные колебания [1–4]. Эти колебания сказываются негативно на функционировании всей системы [5]. Поиск эффективных способов и методов подавления резонансов колебаний в жидкостных трактах устройств остается актуальной научно-технической задачей. Для прекращения звуковых колебаний в упругих средах необходимо нарушить баланс получаемой и теряемой колебательной энергии. Одним из таких методов является подача в акустический контур пузырьков газа. Цель работы заключалась в определении эффективности предложенного метода при гашении стоячих волн в трубопроводе, которая достигалась решением экспериментальных задач.

Эксперименты проводились на стенде, включавший в себя: объекта исследования, измерительные системы и устройство генерации колебаний. Объектом исследования являлась вертикально расположенная цилиндрическая труба, заполненная водой. В нижний конец трубы вмонтировался поршень с резиновой мембраной, соединенный с вибростолом вибрационной установки. Регистрация параметров колебаний в жидкости осуществлялся акустическим датчиком, положение которого в трубе менялось. Пузырьки в воде формировались пористым сжатым газом, истекающим из керамического наконечника, расположенного в нижней части трубы вблизи поршня. Пузыри газа полидисперсные. формировать в жидкости звуковые колебания различной частоты и амплитуды. Путем подбора частоты колебаний поршня в трубе 5 можно создать резонансные колебания.

Результаты исследований и их анализ. Для исследования влияния вида газа подаваемого в жидкость на уровень звукового давления в стоячей волне были выбраны газы (азот, диоксид углерода и аргон). Обосновано это тем, что выбранные газы являются инертными. Экспериментальные исследования проводились на одном и том же объемном расходе газов. Влияние газовых пузырьков в жидкости на уровень звукового давления в стоячей волне исследовались на основной резонансной частоте и двух последующих обертонах: 260 Гц, 770 Гц, 1250 Гц. В экспериментах длина трубы не менялась и

соответствовала 1,5 м. Эксперименты показывают, что снижение уровня звукового давления зависит как от вида газа, так и от резонансных частот. Наибольшее снижение уровня звукового давления наблюдается при подаче в жидкость аргона.

Причем, это наблюдается на всех резонансных частотах. Следует отметить интересный факт, что наибольшая диссипация энергии волны происходит на оберitone 770 Гц независимо от вида газа. Углекислый газ на звуковую волну оказывает меньшее воздействие, чем аргон и азот. Для выяснения причин выявленной закономерности проводились исследования содержания газов в газожидкостной смеси как при неподвижном положении поршня, так и при его колебаниях на частотах равных резонансным и далее рассчитывались плотности смесей. Замечено, что при подаче в жидкость разных газов с одним и тем же объемным расходом их содержание в смеси отличается, что сказывается на их плотности. В частности, плотность аргона в газопузырьковой жидкости имеет наименьшее значение, в том числе при неподвижном положении поршня. Наибольшее значение плотности у смеси диоксида углерода с водой. Необходимо отметить факт увеличения плотности смесей с увеличением резонансных частот. Заключение. Экспериментальные данные, приведенные в данной работе, позволяют прийти к выводу о том, что нарушить баланс получаемой и теряемой колебательной энергии в резонансном контуре можно подачей в нее инертных газов. Из исследованных газов наиболее эффективным является аргон.

### Список литературы:

4. А.Б. Роскин, Устройства для стабилизации колебаний давления и расхода в тепловых сетях. Новости теплоснабжения, № 02, 2004 г, с. 23–31.
5. Р.А. Сунчари., Машков М.А., Матросов А.В. Неустойчивость и автоколебания в гидравлических следящих системах. Динамика и виброакустика. Т.4, № 3, 2018 г., с. 16–25.
6. С.А. Андреева. Инновационные методы диагностики тепловых сетей. Новости теплоснабжения, № 4 (200), 2017 г., с. 22–38.
7. В.М.Молочников, О.А.Душина, А.А.Паерелий, С.А. Колчин. Переход к турбулентности в канале при отрыве потока за поперечными выступами// Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского.- Н.Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И.Лобачевского, -2011, - № 4. – с. 31–34.
8. Л.И. Чернявский. Автоматическое регулирование паровых и газовых турбин: повышение надежности и точности систем с проточными гидроусилителями. - СПб: Энерготехника.- (Серия «Проблемы энергетики», вып.4,1991 г.)

УДК 621.326.72

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОЛЬФРАМОВЫХ НИТЯХ НАКАЛА

Захаров Ю.А., Гоц С.С., Бахтизин Р.З., Шарипов Т.И.

Башкирский Государственный университет,  
450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

Для оценки надёжности и долговечности изделий в электротехнике и радиоэлектронике важно знать зависимость срока их службы от условий эксплуатации (температуры, напряжения, тока, и т. д.). В данной работе экспериментально исследовано изменение темпа протекания деградационных процессов газонаполненных ламп накаливания при 3 различных значениях среднеобъемной температуры нити накала. Как сопутствующие явления изучены также спектральные и корреляционные характеристики низкочастотных (НЧ) токовых флуктуаций в нитях накала.

В качестве объектов исследования использованы нити накала ламп накаливания. Предметом исследования являлись деградационные процессы, а также – сопутствующие им импульсные НЧ токовые флуктуации в нитях накала. Среднеобъемная температура нагрева нитей накала определялась с помощью метода термосопротивления [1, 2].

Для исследования длинновременных деградационных процессов использовался метод компенсации напряжения [1]. Относительное изменение сопротивления  $R_{НН}(t)$  нитей накала во времени  $t$  определялось по формуле:

$$\delta_R(t) = R_{НН}(t)/R_{НН}(0) - 1,$$

где  $R_{НН}(t)$  рассчитывалось согласно [1]. Для каждого из трёх значений напряжения источника питания  $U_{ИП}$  проводилось по 1 измерению с каждой из 2 ламп. Время деградации  $T_d$  оценивалось по формуле:

$$T_d = T_{изм}/\delta_R(T_{изм}),$$

где  $T_{изм}$  – продолжительность одного измерения, равная примерно 9,166 ч. Получены соответственно времена деградации  $2,2 \cdot 10^4$  ч,  $6,6 \cdot 10^3$  ч и  $4,0 \cdot 10^3$  ч для лампы № 1 и  $2,8 \cdot 10^4$  ч,  $4,4 \cdot 10^3$  ч и  $4,0 \cdot 10^3$  ч для лампы № 2. На рисунке 1 показаны сглаженные методом наименьших квадратов зависимости  $\delta_R(t)$  для лампы № 1 при двух различных среднеобъемных температурах нити накала.

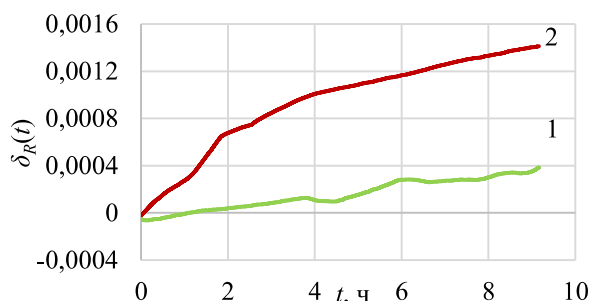


Рис. 1. Зависимости относительного изменения сопротивления нити накала от времени при среднеобъемных температурах 1700 К (кривая 1) и 2200 К (кривая 2).

Для исследования импульсных НЧ токовых флуктуаций использовался мостовой метод [3]. По измененным значениям напряжения  $U_{mV(t)}$  НЧ флуктуаций

рассчитывалась центрированная зависимость флуктуаций тока от времени [3]:

$$\Delta I_{НН} = (U_{mV}(t) - U_{mVcp}) / (\sqrt{2}R),$$

где  $R$  – сопротивление проволочных нагрузочных резисторов [3],  $U_{mVcp}$  – среднее значение  $U_{mV(t)}$  за время измерения. Измерения проводились для 3 различных значений напряжения источника питания  $U_{ИП}$ , которые подбирались таким образом, чтобы падение напряжения  $U_{НН}$  на нити накала при использовании метода компенсации напряжения было равно  $U_{НН}$  при использовании мостового метода. Для каждого значения  $U_{ИП}$  проводилось по 3 измерения, по которым рассчитывались автокорреляционные функции (АКФ), спектральные плотности мощности (СПМ), усреднённая АКФ и усреднённая СПМ.

На рисунке 2 показаны усреднённые сглаженные СПМ при 3 различных напряжениях накала, соответствующих температурам  $1,7 \cdot 10^3$  К (кривая 1),  $2,2 \cdot 10^3$  К (кривая 2) и  $2,6 \cdot 10^3$  К (кривая 3).

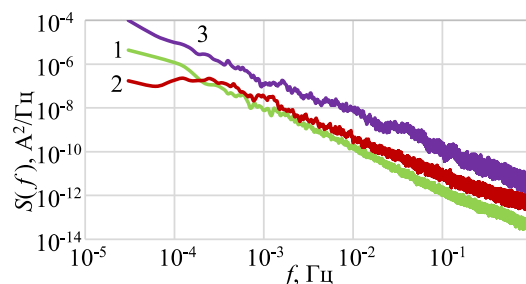


Рис. 2. Усреднённые сглаженные СПМ для НЧ флуктуаций тока в нитях накала при 3 различных температурах

По усреднённым АКФ рассчитаны времена корреляции НЧ токовых флуктуаций. Время деградации превышало время корреляции в  $2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$  раз для кривых 1 и 2 и в  $2,3 \cdot 10^3$  раз для кривой 3.

Таким образом, на основе проведенных исследований в нитях накала установлено:

- 1) Деградационные процессы и НЧ флуктуации тока представляют собой два различных вида физических процессов, характерные времена протекания которых на несколько порядков различаются между собой.
- 2) Время деградации и время корреляции НЧ флуктуаций зависит от температуры нитей накала.

### Список литературы:

1. Zakharov Y.A., Ghots S.S., Sharipov T.I., Bakhtizin R.Z. Degradation processes in tungsten filaments at high temperatures // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. V. 2119. P. 012139.
2. 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.
3. Захаров Ю.А., Гоц С.С., Бахтизин Р.З. Мостовой метод исследования спектров токовых флуктуаций в вольфрамовых нитях накала в диапазоне частот  $1,5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-1}$  Гц // Измерительная техника. 2021. № 5. С. 18–25.

УДК 536.24

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНФУЗОРНО-ДИФФУЗОРНЫХ КАНАЛОВ

Зонов А.С., Фандеев А.С., Киндра В.О.

Национальный исследовательский университет «Московский Энергетический Институт»,  
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Одним из основных факторов, оказывающих негативное влияние на интенсивность конвективного теплообмена в каналах, является нарастание пограничного слоя на стенках теплообменной поверхности. Для борьбы с ним широко применяются различные турбулизаторы потока в виде ребер, шипов и штырьков. Их установка способствует разрушению пристеночных слоев жидкости и перераспределению направления движения теплоносителя, что приводит к росту интенсификации теплообмена [1, 2].

В качестве альтернативного метода увеличения теплосъема может быть рассмотрен вариант с изменением геометрической формы стенок теплообменной поверхности для формирования конфузурно-диффузорного канала с целью изменения структуры течения. В работе рассмотрен базовый канал с проходным сечением квадратной формы и длинной сторон, равной 10 мм. Соотношение ширины «узкой» и «широкой» частей конфузурно-диффузорного канала составляет 1,9, а толщина стенок – 5 мм. Теплопроводность материала стенок – 16 Вт/(м\*К).

Поскольку моделирование исследуемых каналов проводилось в сопряженной постановке, расчетная сетка строилась как для расчетной области потока, так и для материала стенок. Расчетная сетка для объема модели канала – тетраэдрическая, неструктурированная. Максимальный линейный размер элемента составляет 0,5 мм. Расчетная сетка внутреннего объема гибридная, неструктурированная. Зона основного потока формировалась из тетраэдров, а зона пристеночного слоя – из призм. Общее количество призматических слоев равно 13, значение  $y^+$  – 1. Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса использовалась Shear Stress Transport (SST) модель турбулентности.

Анализ результатов математического моделирования показал, что предложенное решение позволяет увеличить общий теплосъем в канале. В конфузурной области теплообмен протекает интенсивнее, тогда как в диффузорной области можно наблюдать обратное (рисунок 1). Это явление обусловлено тем, что в диффузорных элементах присутствует низкоинтенсивные вихреобразования, которые, с одной стороны приводят к локальному снижению плотности теплового потока, а с другой – вносят турбулентные возмущения в поток, что способствует разрушению пограничного слоя и более активному перемешиванию теплоносителя, движущемуся вблизи стенок и в ядре потока. Кроме того, интенсивность теплообмена растет из-за увеличения скорости в сужающейся части канала.

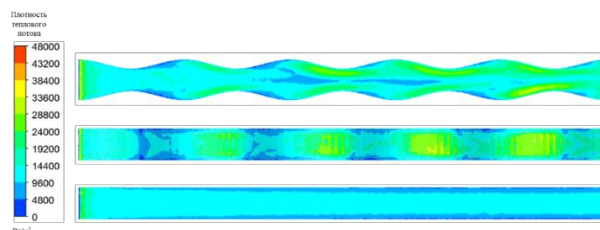


Рис. 1. Эпюры распределения плотности теплового потока для конфузурно-диффузорного и базового каналов при числе Рейнольдса, равном 10000.

Установлено, что в диапазоне чисел Рейнольдса от 20000 до 100000 переход от гладкой формы проточной части канала к конфузурно-диффузорной сопровождается увеличением числа Нуссельта в среднем на 54,1%, при этом линейный коэффициент гидравлических потерь также возрастает в среднем в 1,5 раза. Коэффициент теплогидравлической эффективности в том же диапазоне Re также возрастает в среднем на 5% (рисунок 2).

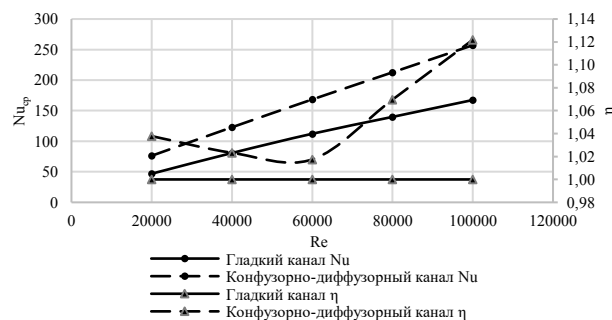


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплогидравлической эффективности и числа Нуссельта от числа Рейнольдса для пластины с конфузурно-диффузорными каналами.

### Список литературы:

1. Киндра В.О., Осипов С.К., Егоров А.А., Роголев А.Н., Шевченко И.В. Т Исследование и разработка штырьково-луночного интенсификатора теплоотдачи для высокоэффективных теплообменных устройств // Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 9. С. 76–89.
2. Киндра В.О., Егоров А.А. Исследование штырьковых турбулизаторов потока, размещенных в конфузурно-диффузорных каналах // Радиотехника, электротехника и энергетика. 2018. С. 791–791.

*Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2020-0020.*



УДК 532.542.1

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Иващенко В.А.<sup>1</sup>, Токарев М.П.<sup>1,2</sup>, Мулляджанов Р.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Атомная энергия на сегодняшний день играет важную роль в производстве электроэнергии по всему миру, при этом, по оценкам Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ), мировые мощности атомной энергетики могут увеличиться вдвое к 2050 году [1]. Одним из перспективных вариантов реализации атомных реакторов являются реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. При этом, несмотря на наличие уже действующих реакторов такого типа, ряд теплофизических задач (выбор теплоносителя, интенсификация теплообмена, снижение гидравлических потерь и др.) в тепловыделяющих сборках требует дополнительного внимания [2, 3].

В данной работе рассматриваются различные жидкометаллические теплоносители на примере модельной сборки ТВЭЛов, показанной на Рис. 1. С помощью метода прямого численного моделирования проводится анализ эффективности теплоотведения на основе систем охлаждения жидкими металлами, исследуются как средние поля скоростей, давления и температуры, так и локальные эффекты вблизи ТВЭЛов, которые могут не вносить существенного изменения в средние поля, но влиять на общую безопасность и энергоэффективность таких систем. Результаты, полученные с помощью вихреразрешающего численного моделирования, в дальнейшем будут использоваться для создания новых моделей турбулентности в рамках RANS-подхода, которые возможно применить для широкого спектра задач при проектировании энергетического оборудования. С помощью данных прямого численного моделирования произведен анализ энергетических спектров в различных точках сборки для выявления наиболее энергичных процессов в потоке.



Рис. 1. Сечение модельной сборки из 6 ТВЭЛов с мгновенной продольной скоростью.

### Список литературы

1. IAEA. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050 // International Atomic Energy Agency, 2021.
2. Драгунов Ю. Г. Разработка реакторной установки для транспортно-энергетического модуля мегаваттного класса // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – №. 1. – С. 4–6.
3. Лемехов В. В., Смирнов В. С., Уманский А. А. Активная зона реактора БРЕСТ: современное состояние и перспективы // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. – №. 2. – С. 89–93.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН. Авторы благодарны Институту теплофизики СО РАН за предоставленные вычислительные ресурсы суперкомпьютера “Каскад”.*

УДК 621.9

## УПРАВЛЕНИЕ КАВИТАЦИОННЫМ ОБТЕКАНИЕМ ГИДРОКРЫЛА ПОСРЕДСТВОМ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ПОДАЧИ ЖИДКОСТИ

Ивашенко Е.И.<sup>1,2</sup>, Козюлин Н.Н.<sup>1,2</sup>, Хребтов М.Ю.<sup>1,2</sup>, Мулладжанов Р.И.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Возникновение разного рода неустойчивостей, в том числе вызванных кавитацией, в проточных трактах гидравлических систем негативным образом сказывается на производительности, надежности и безопасности гидротехнического и гидроэнергетического оборудования. Поэтому на сегодняшний день актуальной задачей, как с точки зрения фундаментальной науки, так и для развития нового, более эффективного гидравлического оборудования, является развитие методов управления кавитирующими течениями. На сегодняшний день широко известны активные и пассивные способы управления. К пассивным методам относится, например, использование специальных покрытий, а именно материал с определенным уровнем шероховатости и морфологии. За элементами шероховатости могут образовываться небольшие отрывы, вихри и зоны рециркуляции, что влияет на процесс зарождения кавитации [1, 2]. Среди активных методов управления наиболее перспективными считаются уменьшение концентрации кавитационных зародышей (микропузырей нерастворенных газов) в набегающем потоке при помощи электролиза и ультразвука [3], а так же инжекция или внесение в поток дополнительного источника импульса [4, 5]. Так в недавней работе [6] был описан экспериментальный метод подавления кавитации на гидпрофиле при малых углах атаки. Было показано, что при малых углах атаки этот метод оказывается крайне эффективным при различных скоростях инжекции  $U_{inj}$ .

В данной работе рассматривается кавитационное течение около модифицированного гидропрофиля при угле атаки  $9^\circ$  и различных числах Рейнольдса ( $Re_c=1.19-1.3 \times 10^6$ ), рассчитанному по хорде крыла  $C=0.1$  м. Модификация крыла представляет собой наличие небольшого выступа (высотой 0.8 мм) на расстоянии  $x/C=0.6$  от передней кромки крыла. Через этот выступ, моделирующий щелевой канал, осуществлялась тангенциальная подача жидкости. Вычислительная область построена согласно экспериментальной работе [6] и представляет собой канал длины 0.43 м с прямоугольным сечением  $0.08 \times 0.25$  м<sup>2</sup>. Ширина канала 0.08 м. Все расчеты проводятся в рамках метода крупных вихрей (Large eddy simulation, LES) с использованием вычислительного кода OpenFoam, основанного на методе конечных объемов, для замыкания уравнений Навье – Стокса используется динамическая модель с дополнительным транспортным уравнением на кинетическую энергию подсеточных масштабов. Вычислительная сетка содержит около  $10.1 \times 10^6$  вычислительных узлов. В расчете применялась процедура динамического сгущения сетки, что приводило к увеличению числа узлов в среднем до  $20 \times 10^6$  узлов. Для моделирования кавитация используется модель

Шнерра-Сауэра, в которой предполагается, что жидкая фаза и пар представляют собой гомогенную смесь [5].

Предведены предварительные расчеты, см. рис. 1. В рамках данной работы будет изучено влияние стационарных внешних возмущений на зарождение и развитие кавитации и турбулентную структуру потока при различных скоростях инжекции. На основе полученных численных результатов будут сделаны выводы об эффективности данного метода управления кавитационными течениями и определен диапазон режимов течения, для которого данный метод целесообразно применять.

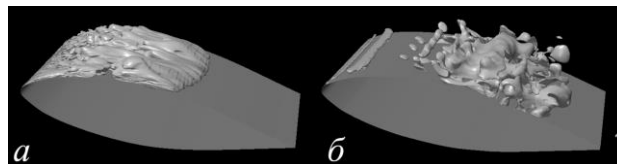


Рис. 1. Мгновенные изоповерхности паросодержания, полученные в расчете без возмущения потока (слева) и с тангенциальной инжекцией (справа).

## Список литературы:

1. Churkin S.A., Pervunin K.S., Kravtsova A.Yu., Markovich D.M., and Hanjalić K. Cavitation on Naca0015 hydrofoils with different wall roughness: high-speed visualization of the surface texture effects //Journal of Visualization. 2016. Т.19. №4. С. 587–590.
2. Kadivar E., Timoshevskiy M.V., Nichik M.Yu., el Moctar O., Schellin T.E., and Pervunin K.S. Control of unsteady partial cavitation and cloud cavitation in marine engineering and hydraulic systems //Physics of Fluids. 2020. Т. 32. №5. С.052108.
3. Chatterjee D. and Arakeri V.H. Towards the concept of hydrodynamic cavitation control //Journal of Fluid Mechanics. 1997. Т. 332. С.377–394.
4. Тимошевский М.В., Запрыгаев И.И., Пervунин К.С., Мальцев Л.И., Маркович Д.М., Ханьялич К. Управление кавитацией на двумерном гидрокрыле посредством непрерывной тангенциальной инжекции //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 12.
5. Wang, W., Zhang, Q., Tang, T., Lu, S., Yi, Q., & Wang, X. Numerical study of the impact of water injection holes arrangement on cavitation flow control //Science Progress. 2020. Т. 103. № 1. С. 0036850419877742.
6. Timoshevskiy M. V., Zapryagaev I. I., Pervunin K. S., Maltsev L. I., Markovich D. M., and Hanjalić K. Manipulating cavitation by a wall jet: Experiments on a 2D hydrofoil //International Journal of Multiphase Flow. 2018. Т. 99, С. 312–328.
7. Schnerr G. H., Sauer J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics //Fourth international conference on multiphase flow. ICMF New Orleans. 2001. Т. 1.

Авторы благодарны совместно суперкомпьютерному центру «Каскад» института теплофизики и Новосибирского государственного университета.

Работа в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 621.9

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ МНОГОРЯДНЫМИ НАКЛОННЫМИ КАНАВКАМИ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРЯМЫХ И ИЗОГНУТЫХ КАНАЛОВ

Исаев С.А.<sup>1,2</sup>, Никущенко Д.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 196210, Россия, Санкт-Петербург, ул. Пилогов, 38

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лодманская, 3

Численно на основе решения уравнений Навье-Стокса и энергии обнаружено явление ускорения ламинарного потока в узком канале с однорядным редким пакетом наклонных овално-траншейных лунок (ОТЛ) на нагретой стенке на стабилизированном [1-3] и начальном [4] участках течения. Установлено увеличение скорости в ядре потока в канале с относительной глубиной наклонных ОТЛ не менее 0.25 до величин, в 1.5 раза превосходящих максимальные скорости в плоскопараллельном канале. Важно отметить для воздушного теплоносителя достижение более чем двукратного увеличения относительной теплоотдачи при отстающем росте относительных гидравлических потерь, что невозможно получить с помощью сферических лунок. Измерения поля скорости в КазНЦ РАН на стенде с оптически прозрачным узким каналом подтверждают численные прогнозы.

Цикл недавних численных исследований [5-13] связан с открытием явления аномальной интенсификации отрывного турбулентного течения воздуха и теплообмена при  $Re=10^4$  на стабилизированном участке узкого канала высотой 1 с нанесенными на нижнюю нагретую стенку однорядными ОТЛ шириной 1.05 и длиной 7.05. При ширине канала 7 и шаге между лунками 6, угле наклона  $45^\circ$  и глубине 0.3 лунки в отрывной зоне в срединном сечении наблюдаются четырехкратное увеличение абсолютной величины максимального относительного трения и почти пятикратный рост относительной теплоотдачи (по отношению к параметрам в плоскопараллельном канале). Экспериментальное и расчетное подтверждение фундаментальных открытий аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных ОТЛ на пластине и на стенке узкого канала выполнено в аэродинамических трубах НИИ механики МГУ.

Хорошее согласие экспериментальных данных с численными прогнозами для стационарного подхода RANS свидетельствует о его приемлемости при расчете высокоинтенсивных струйно-вихревых течений, а также подтверждает управляющий механизм аномальной интенсификации отрывного течения.

Актуальная проблематика вихревой интенсификации теплообмена при обтекании структурированных поверхностей имеет технологические перспективы в трубчатых теплообменниках [14] и в системах охлаждения лопаток двигательных установок [15].

### Список литературы:

1. Исаев С.А., Баранов П.А., Леонтьев А.И., Попов И.А. Интенсификация ламинарного течения в узком микроканале с однорядными наклонными овално-траншейными лунками // ПЖТФ. 2018. Т. 44. Вып. 9. С. 73–80.

2. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Гульцова М.Е. Интенсификация теплообмена при ламинарном вихревом течении воздуха в узком канале с однорядными наклонными овалными лунками // ИФЖ. 2018. Т.91. №4. С.1022–1034.
3. Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G. Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow microchannel // Int.J.HMT. 2019. V. 134. P. 338–358.
4. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В., Попов И.А. Энергоэффективные поверхности с многорядными наклонными овално-траншейными лунками для воздушных конденсаторов // Энергетика. 2020. № 4. С. 3–10.
5. Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. V. 163 (Part.A). P. 202–207.
6. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г. Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклонных однорядных овално-траншейных лунках на стенке узкого канала // ТВТ. 2019. Т. 57. №5. С. 797–800.
7. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В. Ускорение турбулентного потока в узком обдуваемом канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклонных овално-траншейных лунок на стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т.26. №5. 697–702.
8. Isaev S.A., Gritckevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V. Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // Int. J. HMT. 2019. V. 145. P.118737.
9. Исаев С.А., Мазо А.Б., Никущенко Д.В., Попов И.А., Судаков А.Г. Влияние на аномальную интенсификацию отрывного турбулентного течения угла наклона однорядных овално-траншейных лунок на стабилизированном гидродинамическом участке узкого канала // ПЖТФ. 2020. Т. 46. Вып. 21. С.18-21.
10. Mironov A., Isaev S., Skrypnik A. and Popov I. Numerical and Physical Simulation of Heat Transfer Enhancement Using Oval Dimple Vortex Generators —Review and Recommendations // Energies. 2020. V. 13. P. 5243.
11. Миронов А.А., Исаев С.А., Скрыпник А.Н., Попов И.А., Гортышов Ю.Ф. Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овално-траншейными вихрегенераторами // ППТ. 2020. Т. 12. №9. С. 386–402.
12. Исаев С.А., Чулюнин А.Ю., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Анализ аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена на стабилизированном участке узкого канала с однорядными наклонными овално-траншейными лунками при использовании различных сеток и моделей турбулентности // ТВТ. 2021. Т. 59. № 1. С. 116–125.
13. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Интенсификация отрывного течения в наклонных однорядных овално-траншейных лунках на стенке узкого канала // ИФЖ. 2021. Т.94. №1. С.160-168.
14. Исаев С.А., Судаков А.Г., Чорный А.Д., Жукова Ю.В., Усачов А.Ю. Интенсификация теплообмена в микротрубе с коридорным пакетом сферических и наклонных овално-траншейных лунок при прокачке трансформаторного масла // ТВТ. 2019. Т. 57. №. 6. С. 866–869.
15. Kong D., Zhang C., Ma Z., Liu C., Isaev S.A., Guo T., Xie F. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of swirling jet on a dimpled surface with effusion holes at turbine blade leading edge //ATE. 2022. V. 209. P. 118243.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-19-00056) и частичной поддержке РФФИ (грант № 21-58-52013).*

УДК 621.327.539

## ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ ИСТОЧНИК УФ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА В ПАРАХ КАДМИЯ

Исупов М.В.

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

Несмотря на существенный прогресс в области светодиодных источников света, достигнутый в последние двадцать лет, газоразрядные ультрафиолетовые (УФ) источники излучения по-прежнему активно применяются в современных технологиях УФ обеззараживания и фотохимического синтеза. Это обусловлено отсутствием УФ светодиодов, способных генерировать мощные (десятки и сотни ватт) потоки коротковолнового излучения, необходимые для создания высокопроизводительных фотохимических реакторов, систем обеззараживания воды и воздуха.

Среди множества газоразрядных УФ ламп, применяемых в настоящее время, наибольшее распространение получили ртутные дуговые лампы низкого давления. Это обусловлено как высокой эффективностью преобразования мощности разряда в резонансную линию ртути 253.7 нм, так и простотой конструкции газоразрядной лампы, представляющей собой газоразрядную трубку с двумя электродами. Однако, при всей простоте своей конструкции, дуговые УФ лампы низкого давления обладают рядом физических ограничений, существенно затрудняющих задачу увеличения мощности лампы и соответственно повышения производительности систем УФ обработки. Так, для предотвращения распыления электродов лампы под воздействием ионной бомбардировки используют повышенное давление буферного газа, составляющее для дуговых ламп низкого давления 2–4 мм.рт.ст., в то время как максимальный выход УФ излучения ртутной лампы достигается при давлениях буферного газа 0.1–1 мм.рт.ст. [1]. Также, существенно ограничивается сила тока (и соответственно мощность) дугового разряда.

Вышеуказанные физические ограничения дуговых ламп низкого давления, связанные с процессом разрушения газоразрядных электродов, могут быть преодолены за счет перехода к безэлектродному (индукционному) принципу генерации разряда. Безэлектродный принцип генерации разряда позволяет выбирать наиболее оптимальные условия (давление буферного газа, сила тока разряда), соответствующие достижению максимального потока УФ излучения лампы и соответственно максимальной производительности системы УФ обработки. Однако, эффективная генерация “классических” индукционных разрядов с соленоидальным индуктором возможна лишь на частотах мегагерцового диапазона, что требует применения дорогостоящих ВЧ источников питания.

Частота генерации индукционного разряда может быть снижена на два-три порядка, до частот килогерцового диапазона, за счет усиления магнитной связи между индуктором и безэлектродным разрядом с по-

мощью ферромагнитного сердечника [2], что открывает новые возможности для разработки и создания безэлектродных газоразрядных ламп. В настоящее время опубликован ряд работ, посвященных разработке безэлектродных ртутных УФ ламп низкого давления на основе низкочастотного индукционного разряда [3, 4].

Известно, что газовый разряд низкого давления в парах кадмия также позволяет эффективно осуществлять преобразование мощности разряда в резонансную линию кадмия 326.1 нм [5]. Применение кадмиевых УФ ламп может представлять интерес в тех случаях, когда максимум кривой спектральной световой эффективности процесса смещен в сторону более длинных волн, по сравнению с резонансной линией ртути 253.7 нм.

Выполнено экспериментальное исследование излучательных характеристик НЧ (250 кГц) индукционного разряда в смеси паров кадмия (0.2, 1.2 Па) и аргона (60 Па). Изучена зависимость выхода излучения резонансной линии кадмия 326.1 нм от силы тока разряда и распределение яркости спектральных линий кадмия по радиусу газоразрядной трубки. Показана асимметрия профилей яркости спектральных линий кадмия, а также спад интенсивности линий в центре газоразрядной трубки. Выдвинуто предположение, что наблюдаемая асимметрия профилей яркости спектральных линий вызвана спадом напряженности электрического поля НЧ индукционного разряда во внешней области тороидальной газоразрядной трубки, тогда как спад интенсивности излучения в центре газоразрядной трубки вызван уменьшением концентрации атомов кадмия за счет механизма радиальной “откачки” атомов кадмия посредством процесса амбипольной диффузии.

### Список литературы:

1. Разрядные источники света / Г.Н. Рохлин. М.: Энергоатомиздат, 1991. 719 с.
2. Godyak V. Ferromagnetic enhanced inductive plasma sources // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. 283001.
3. Левченко В.А., Попов О.А., Свитнев С.А., Старшинов П.В. Экспериментальные исследования электрических и оптических характеристик безэлектродной УФ лампы трансформаторного типа // Светотехника. 2014. №6. С. 39.
4. Левченко В.А., Попов О.А., Свитнев С.А., Старшинов П.В. Электрические и излучательные характеристики лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой диаметром 16.6 мм // Светотехника. 2016. №1. С. 41.
5. Petrov G.M., Petrova Ts., Ogoyski A., Blagoev A.B. Cd–Ne direct current glow discharge: An efficient source of ultraviolet radiation // Appl. Phys. Letters. 2000. V. 77. No.1 P. 40.

*Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.*

УДК 621.384.63, 539.1

## РАСЧЕТ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛО-НАГРУЖЕННЫХ УСТРОЙСТВ РАБОЧИХ СТАНЦИЙ СТРОЯЩЕГОСЯ СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ

Кабов О.А.<sup>1</sup>, Золотарев К.В.<sup>2</sup>, Зубавичус Я.В.<sup>2</sup>, Винокуров В.В.<sup>1,2</sup>, Винокуров В.А.<sup>1</sup>,  
Фиников К.А.<sup>3</sup>, Пуховой М.В.<sup>1,2</sup>, Быковская Е.Ф.<sup>1</sup>, Кочкин Д.Ю.<sup>1</sup>, Роншин Ф.В.<sup>1</sup>,  
Мунгалов А.С.<sup>1</sup>, Димов С.В.<sup>1,2</sup>, Марчук И.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup>Центр Коллективного Пользования «СКИФ», 630090, Новосибирск, пр. Морской, 2

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Из-за высокой плотности энергии в синхротронном пучке и его потенциальной опасности, нахождения большей части устройств рабочих станций в вакууме, высоких требований к величинам деформаций оптических элементов, обеспечение теплового менеджмента элементов рабочих станций, использующих синхротронное излучение (СИ), представляет собой уникальные, сложные, не типовые задачи. Работа посвящена тепловому расчету наиболее теплонагруженных элементов рабочих станций вигглеровских источников синхротронного излучения Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ). Его строительство ведется в Новосибирске. На первом этапе будет создано шесть исследовательских рабочих станций для характеристики структуры объектов в прикладной и фундаментальной науке: материаловедении, новых магнитных и сверхпроводниковых материалах, катализаторах, источниках тока, нано-электронике, геологии, медицине, биологии и археологии. В двух из них, 1.1. и 1.4, СИ создается сверхпроводящими вигглерами. При этом полная мощность излучения приближается к 49 кВт, а плотность мощности на оси будет составлять до 92 кВт/мрад<sup>2</sup>. Наиболее теплонагруженными оптическими элементами этих рабочих станций являются алмазные вакуумные окна (АВО), отсекающее область с высоким вакуумом в 10<sup>-8</sup> Па, примеры см. рис.1.



Рис.1. Фотография АВО, на основе CVD-алмаза, выпускаемого промышленностью, [1 и 2, соответственно].

Возможность отвести от АВО тепло, выделяющееся при поглощении излучения рабочего пучка без его значимых деформаций, нарушения целостности алмазной пластины во многом определяет класс источника синхротронного излучения как 4+, то есть фактическую яркость пучка, доступную потребителю. Проведены тепловые расчеты оригинальной конструкции этого элемента рабочих станций СКИФ.

Важной особенностью теплопередачи в системе охлаждения АВО является наличие контактных со-

противлений между оптическим элементом и системой охлаждения, связанной с нахождением оптического устройства в вакууме. Для существенного снижения контактного сопротивления между алмазным фильтром и системой охлаждения, а также для вакуумной герметизации предложено применить тонкую пленку жидкого металла между ними, [3–4]. Здесь представлены расчеты с использованием пакета ANSYS Fluent распределения температуры, как в [3–4], величин деформаций и термических напряжений в центральном сечении алмазного фильтра толщиной 300 мкм при различных: его диаметрах 50–70 мм, начальных температурах и расходах воды, давлениях.

В работе представлен эффективный вариант охлаждения CVD-алмазных фильтров с помощью мини-каналов. Здесь максимальная температура алмазной пластины (342.6 С) и тепловые деформации с 30% запасом по их величине не превышают предельных значений. При этом охлаждение способно отвести до 2,0 кВт/см<sup>2</sup> удельного потока тепла. Однако двух кратный запас прочности при тепловых напряжениях в алмазной пластине может быть достигнут только при снижении удельной мощности тепловыделения до уровня 1,5 кВт/см<sup>2</sup>. Расчеты убедительно показывают, что предложенный вариант охлаждения мини-каналами удовлетворяет требованиям рабочих станций первой очереди источника синхротронного излучения «СКИФ».

### Список литературы:

1. Schildkamp, W & Nikitina, Liudmila. (2012). Manufacturing of diamond windows for synchrotron radiation. The Review of scientific instruments. 83. 095104. 10.1063/1.4748265
2. Diamond Optical Vacuum Windows. Diamond Materials GmbH, Freiburg, Germany // [Электронный ресурс]. – www.diamond-materials.com (дата обращения 01.06.2021)
3. Kabov O.A., Zubavichus Ya.V., Cooper, K.E., Pukhovoy M.V., Vinokurov V.V., Finnikov K.A., Ronshin, F.V. Nikitin, A.A., Bykovskaya E.F., Vinokurov, V.A., Mungalov A.S and Marchuk, I.V. Device cooling features in wiggler synchrotron workstations. Journal of Physics: Conference Series. 2021 2119. 012129. 10.1088/1742-6596/2119/1/012129
4. Kabov O.A., Zubavichus Ya.V., Cooper, K.E., Pukhovoy M.V., Vinokurov V.V., Finnikov K.A., Ronshin, F.V. Nikitin, A.A., Bykovskaya E.F., Vinokurov, V.A., Mungalov A.S and Marchuk I.V. Features of device cooling in wiggler synchrotron workstations. Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2057. 012028. 10.1088/1742-6596/2057/1/012028.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН  
121031800213-0.

УДК 535.8

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ НАЛЕДИ НА МОДЕЛИ ЛОПАСТИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Какаулин С.В., Кабардин И. К., Гордиенко М.Р.

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

Накопление льда на элементах открытых конструкциях представляет собой серьезную проблему для обеспечения безопасности и эффективной эксплуатации конструкций и оборудования. Обледенение представляет угрозу ветрогенераторам и линиям электропередач, телекоммуникационному и метеорологическому оборудованию, строительным и мостовым конструкциям, береговым сооружениям и судовому оборудованию и прочее. Эти объекты испытывают экстремально высокую дополнительную нагрузку из-за массивного накопления льда на их поверхности, что приводит к серьезным аварийным ситуациям, в том числе и со смертельным исходом.

Цель исследования связана с изучением обледенения обтекаемых потоком воздуха тел. Обледенение является одной из основных проблем, сдерживающих эффективное использование ветрогенераторов для автономного энергоснабжения отдаленных населенных пунктов крайнего севера. Сейчас эта тематика перспективна и очень актуальна для обеспечения динамического развития энергетики в Арктических и отдаленных регионах Сибири. Эффективное решение поставленных противообледенительных задач в области ветроэнергетики с учетом их обобщения для применения к другим объектам жизнедеятельности может стать прорывной темой при решении данной проблемы для других направлений развития Арктического региона, что подчёркивает принципиальную важность развития этих знаний в целом.

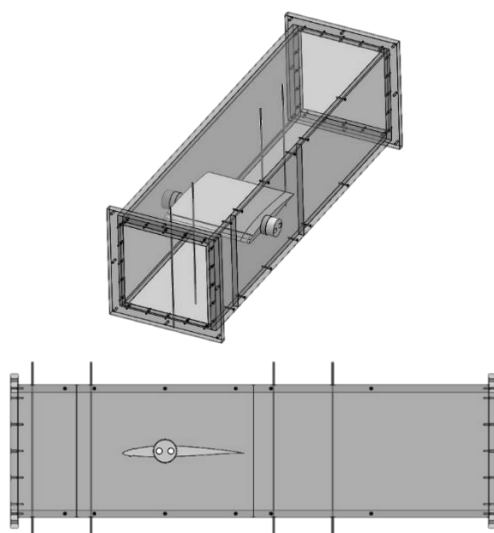


Рис. 1. Модель секции рабочего участка с лопастью ветрогенератора (профиль RG-15).

Для проведения экспериментальных исследований испытания модели лопастей ветрогенератора использовалась климатическая камера. Был создан экспериментальный участок рис. 1, в котором можно проводить исследования с различными тестируемыми объектами. Экспериментальный стенд состоит из: рабочего участка квадратного сечения (размеры по внутренней части 200×200 мм) выполненный из органического стекла; параллельно соединенные трубки Ранка для охлаждения воздуха; хонейкомб для равномерного распределения потока по каналу; парогенератор для увлажнения воздуха; система труб и клапанов для подачи сжатого воздуха.

Были проведены эксперименты с использованием модели лопасти ветрогенератора. Парогенератор располагался на расстоянии 40 см от тестируемого объекта. Средняя скорость потока во время проведения эксперимента составила 3 м/с. Процесса обледенение в диапазоне температур от  $-2$  до  $-10^{\circ}\text{C}$  на лопатке не наблюдалось. Температура набегающего воздуха была уменьшена до  $-10^{\circ}\text{C}$  и на поверхности лопатки начал образовываться иней. После повышения температуры до  $-15^{\circ}\text{C}$  на кромке лопатки началось нарастание изморози. В течение 30 минут на передней кромке лопатки образовалась плотная изморозь эллиптической формы, направленной в сторону набегающего потока. Толщина образовавшейся изморози на кромке лопатки составляет 0.8 мм.

Полученные данные позволяют получить новые научные результаты для описания аэродинамического взаимодействия потока с охлаждаемыми поверхностями и развитие методов борьбы с обледенением.

### Список литературы:

1. I.K. Kabardin, S.V. Dvoynishnikov, V.G. Meledin, I.V. Naumov The distant diagnostics of transparent ice on wind turbine blades on the basis of total internal reflection // Journal of Engineering Thermophysics. 2016. № 4. P. 504-508
2. Yibing Wang, Yuanming Xu. An effect assessment and prediction method of ultrasonic de-icing for composite wind turbine blades// Renewable Energy №118. 2018. P. 1015-1023
3. Sabatier J., Lanusse P. CRONE control based anti-icing/deicing system for wind turbine blades // Control Engineering Practice №56. 2016. P. 200-209
4. Okulov, V.; Kabardin, I.; Mukhin, D.; Stepanov, K.; Okulova, N. Physical De-Icing Techniques for Wind Turbine Blades. Energies 2021. 14. 6750.

Работа выполнена при поддержке РФФ в рамках научного проекта 21-19-00205.

УДК 532.526.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОТСОСА НА ТЕЧЕНИЕМ ЗА ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ТРЕХМЕРНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ НА МОДЕЛИ ПРЯМОГО КРЫЛА

Каприлевская В.С., Павленко А.М., Катасонов М.М., Козлов В.В.

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

В настоящее время одной из основных проблем аэродинамики остается проблема управления переходом ламинарного течения в турбулентное. В вопросе обтекания крыловых профилей ключевой задачей является возможность полного устранения или максимального смещения точки перехода пограничного слоя в турбулентное состояние к задней кромке [1, 2]. Отсасывание пограничного слоя является одним из эффективных способов управления течением. Данный метод позволяет подавлять волны Толлмина-Шлихтинга и смещать вниз по потоку область перехода, в результате чего уменьшается сопротивление трения. В экспериментальных исследованиях [3] было показано, что с помощью отсоса возможно уменьшить амплитуду возмущений в потоке поперек всего пограничного слоя, а также снизить интенсивность вторичной неустойчивости [4].

Экспериментальные исследования проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН. Скорость набегающего потока  $U_\infty$  составляла 7.3 м/с. Число Рейнольдса, вычисленное по хорде модели, составляло  $Re_c = 0.24 \times 10^6$ . Исследуемая модель представляла собой прямоугольное крыло с симметричным профилем NASA 0012. Хорда данного крыла составляла 501 мм, размах 950 мм, максимальная толщина 60 мм (Рис. 1). В рабочей части трубы модель располагалась вертикально и под отрицательным углом атаки  $\alpha = -6.5^\circ$ . Отсос пограничного слоя осуществлялся через гидравлически-гладкую мелкоперфорированную секцию длиной 90 мм и шириной 60 мм, которая была установлена вровень с основной поверхностью.

Исследовалось влияние двух видов возмущений: естественные и искусственные. Генерация последнего типа возмущений была реализована при помощи наложения акустического поля частотой 120 Гц, интенсивность звука составила 90 дБ. Стационарные возмущения вводились с помощью трехмерного элемента шероховатости, выполненного в виде цилиндра диаметром 1.8 мм и высотой 1.7 мм. Элемента шероховатости располагался на расстоянии 215 мм от передней кромки.

В итоге проведенных экспериментальных исследований было показано, что удалось реализовать отсос пограничного слоя, при котором при работе с естественными возмущениями происходит снижение интенсивности пульсаций скорости в следе за шероховатостью в пять раз. При работе с акустическим полем величина интенсивности пульсаций снижается в 90 раз. Возможно полностью убрать стационарную продольную структуру, формирующуюся за элементом

шероховатости, с помощью распределенного отсоса. После прохождения области отсоса происходит реламинаризация течения – пограничный слой становится ламинарным и однородным по размаху крыла.

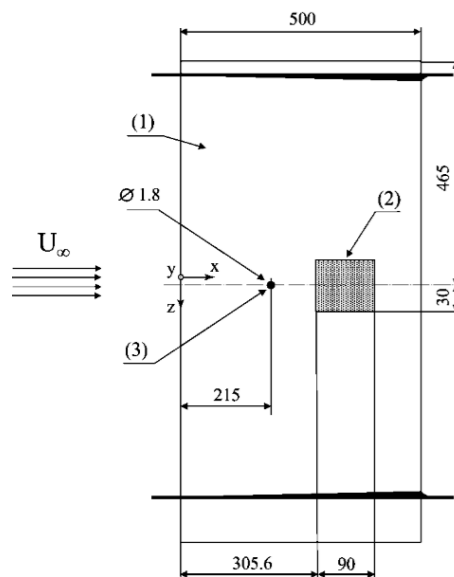


Рис. 1. Модель крыла: 1 – прямое крыло; 2 – мелкоперфорированная поверхность; 3 – трехмерный элемент шероховатости.

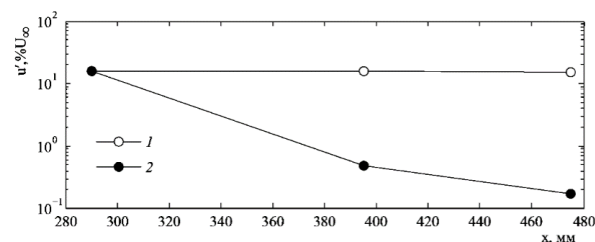


Рис. 2. Распределение пульсаций скорости при наложении акустического поля: 1 – без отсоса; 2 – с отсосом.

### Список литературы

1. Schubauer G.B., Skramsted H.K. Laminar boundary layer oscillation and stability of laminar flow // NACA Rep. 1948. Vol. 909. p. 36
2. Boiko A.V., Grek G.R., Dovgal A.V., Kozlov V.V. The origin of turbulence in near-wall flows. // Berlin: SpringerVerlag, Heidelberg, 2002. p. 290
3. Козлов В.В., Левченко В.Я., Щербаков В.А. Развитие возмущений в пограничном слое при шелловом отсасывании. // Учен. зап. ЦАГИ. - 1978. Т.9. № 2. С. 99–105.
4. Бойко А.В., Козлов В.В., Сызранцев В.В., Щербаков В.А. Активное управление вторичной неустойчивостью в трехмерном пограничном слое // Теплофизика и Аэромеханика. — 1999. Т. 6. № 2. С. 181–192.

УДК 621.9

## НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В СЛОЕ ДИЭЛЕКТРИКА ПРИ СВЧ-ОБЛУЧЕНИИ

Карелин В.А., Саломатов Вл. В.

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

В последние десятилетия широко развиваются и используются технологические процессы, основанные на воздействии электромагнитной энергии сверхвысокочастотного диапазона на диэлектрические материалы. Области применения энергии СВЧ расширяются с каждым годом. К ним относятся: СВЧ-сушка угля, древесины, растений и др., производство строительных материалов, стерилизация, СВЧ снего- и льдоплавление огромных объемов с дорог и тротуаров городов, автотрасс, взлетно-посадочных полос аэродромов и многое другое [1]. Интерес к научным исследованиям объясняется рядом уникальных преимуществ СВЧ-технологий, которые реализуют экологически чистые режимы обработки, быстродействующие, энергоэкономичные, авторегулируемые и др [2].

В данной работе рассматривается СВЧ-обработка снежно-ледяной массы, этапами которой являются нагрев и плавление. Поиск базовых закономерностей указанных процессов, которые лежат в основе их оптимизации, управления, проектирования и др., предвещает построение математических моделей и их реализация аналитическими либо численными методами. Была построена нелинейная математическая модель задачи Стефана для слоистой системы диэлектриков, позволяющая учесть зависимости диэлектрической проницаемости и других параметров среды от температуры, а также от параметров источника СВЧ-излучения.

Формула для микроволновой мощности на единицу объема вещества, выглядит следующим образом:

$$P(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E(x, y, z, t)|^2$$

Где  $\omega$  – циклическая частота микроволн,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\epsilon''$  – мнимая часть диэлектрической проницаемости,  $E$  – напряженность электрического поля.

Модель переноса тепла построена следующим образом: на верхнюю границу слоя диэлектрика (лёд) падает СВЧ-излучение.

Как известно мнимая часть диэлектрической проницаемости льда при температуре  $-12^\circ\text{C}$  0.003. Из формулы (1) видно, что в силу этого потери мощности микроволн во льду чрезвычайно малы. После того, как микроволновая энергия проникает в слой льда, она воздействует непосредственно на следующую поверхность (в данной задаче это слой воды). Вода обладает гораздо большей мнимой частью диэлектрической проницаемости и может поглощать часть микроволновой энергии с последующим преобразованием в тепловую энергию, тем самым плавя лед на стыке между слоем поверхности воды и слоем льда. Когда лед на

стыке превращается в воду, жидкая вода также может поглощать микроволновую энергию в большом количестве, что значительно ускоряет таяние льда. Схема данной задачи (см. рис. 1).

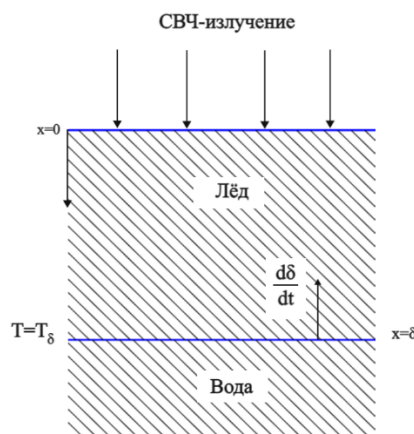


Рис. 1. Схема воздействия СВЧ-излучения на слой льда.

При этом был сделан ряд допущений: 1) Микроволновое излучение падает на слой льда вдоль оси X 2) Источник тепла моделируется по закону Бугера 3) Начальные температуры слоев льда и воды постоянны. При этом уравнения теплопроводности (индекс  $i$  обозначает воду и лёд), начальные условия, условия на границе фазового перехода и других границах задаются следующим образом:

$$\frac{\partial T_i(x, t)}{\partial t} = a_i \frac{\partial^2 T_i(x, t)}{\partial x^2} + \frac{q_i}{c_i \rho_i} e^{-\nu_i x}$$

$$T_i(x, 0) = \varphi_1(x), 0 < x < \delta; T_i(x, 0) = \varphi_2(x), \delta < x < l$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{1}{\rho H} \left( \lambda_w \frac{\partial T_w(\delta, t)}{\partial x} - \lambda_l \frac{\partial T_l(\delta, t)}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0; \frac{\partial T(\infty, t)}{\partial x} = 0$$

С использованием численных методов были получены температурные распределения внутри слоя льда и воды, определена динамика движения границы фазового перехода, найдены оптимальные параметры источника.

### Список литературы:

1. Millerd F (2011) The potential impact of climate change on Great Lakes international shipping. *Clim Change J* 104(3–4):629–652
2. Horais G, Pichler S, Stadler A, Gossler W, Kappe CO (2001) Microwave-Assisted Organic Synthesis - Back to the Roots. In: 5th international electronic conference on synthetic organic chemistry (ECSOC-5).

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (AAAA-121031800229-1).



УДК 532.529.5

## ПУЛЬСАЦИОННАЯ СТРУКТУРА НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕНИЯ НА СТЕНКЕ В ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ

Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Воробьев М.А.

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

Турбулентное 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 пределах  $0,32 \div 0,40$ . Все исследования, выполненные ранее, проводились в трубах больших диаметров, больше 30 мм, а также при внешнем обтекании плоской пластины. В цикле работ по исследованию газожидкостных течений [3, 4] отсутствуют данные о поведении пульсаций трения в однофазном потоке. Остается не изученным вопрос о поведении пульсаций трения в кольцевых каналах.

Задачей настоящей работы являлось экспериментальное исследование пульсационной структуры напряжения трения на стенке в турбулентных режимах течения в концентрических кольцевых каналах с различным отношением диаметров.

Экспериментальная установка представляла замкнутый гидравлический контур, оснащенный системой термостатирования жидкости. Для измерения расхода жидкости использовалась система расходомерных диафрагм, позволяющая изменять расход жидкости в требуемых пределах. Измерение напряжения трения на стенке производилось электродиффузионным методом [3, 4]. В качестве рабочих участков гидравлического контура использовались кольцевые каналы. Внутренний диаметр внешней трубы составлял 21 и 32 мм. В эти трубы вставлялись соосно центральные трубы различного внешнего диаметра. Во всех рабочих участках монтировались электродиффузионные датчики трения. Датчики монтировались как на внешней, так и на внутренней трубах. 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 корреляции Блазиуса для турбулентного течения. При этом учитывалось различие величины напряжения трения на стенке на внешней и внутренней трубе.

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 и среднее квадратичное значение пульсаций трения.

На рис. 1 приведена характерная зависимость относительных пульсаций трения  $\varepsilon$  в зависимости от числа Рейнольдса для рабочего участка с внешним диаметром 21 мм (точки 1) и внутренним диаметром 4 мм (точки 2). Видно, что относительные пульсации трения на внутренней трубе существенно ниже, чем на внешней. Такое поведение сохраняется для всех соотношений диаметров. Аналогичное поведение пульсаций трения при продольном обтекании стержня отмечено в работе [4]. Для сравнения на графике приведены относительные пульсации трения для трубы с внутренним диаметром 4 мм (точки 3).

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

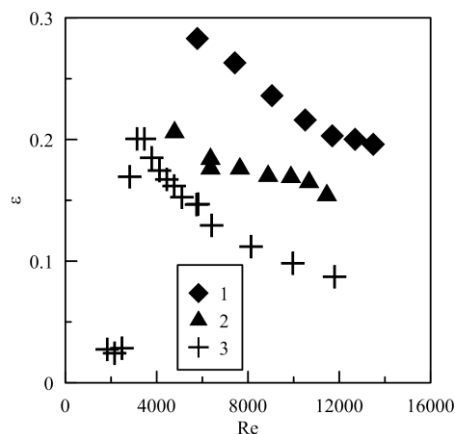


Рис. 1. Зависимость относительных пульсаций трения от числа Рейнольдса в кольцевом канале  $21 \times 4$  мм.  
1 – внешняя стенка, 2 – внутренняя стенка,  
3 – круглая труба диаметром 4 мм.

### Список литературы:

1. Wietrzak A., Lueptow R.M. Wall shear stress and velocity in a turbulent axisymmetric boundary layer. *J. Fluid Mech.* 259, 191-218 (1994).
2. Alfredsson P.H., Johansson A.V. The fluctuating wall shear stress and the velocity field in a viscous sublayer. *Phys. Fluids*, 31, 1026-1033 (1988).
3. Накоряков В.Е., Кашинский О.Н. Турбулентная структура двухфазных газожидкостных течений. *Теплофизика и аэромеханика*, т. 4, № 2, 115-127 (1997).
4. Vorobyev M.A., Kashinsky O.N., Wall shear stress in a model of  $3 \times 3$  rod bundle. *J. Eng. Thermophysics*, 29, 388-392 (2020).

Работа выполнена в рамках госконтракта с ИТ СО РАН.

УДК 532.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАРТИНЫ ТЕЧЕНИЯ В Т-МИКРОКАНАЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ТЕЧЕНИЯ

Кашкарова М.В., Кравцова А.Ю.

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

Микроканалы широко используются в химической, биологической и других видах промышленности. Для повышения эффективности их работы исследователями проводятся работы по изучению структуры течения в каналах при различных характеристиках потока [1]. Целью данного исследования является изучение картин течения при варьировании величины соотношения массового расхода во входных каналах, а так же числа Рейнольдса.

В работе проведено исследование течения двух ньютоновских жидкостей в т-микроканале. Размеры входных каналов –  $120 \times 120$  мкм, размер выходного канала –  $120 \times 240$  мкм.

Моделирование потока проводилось с использованием пакета STAR CCM+. В качестве основных уравнений для моделирования динамики потока использовалась нестационарная система Навье-Стокса. Полагалось, что рабочая жидкость имеет постоянную плотность и вязкость. Поток считался ламинарным. В расчете задавались следующие постоянные величины:  $Dh$  – характерный диаметр,  $Re$  – число Рейнольдса,  $\rho$  – плотность жидкости,  $S$  – площадь сечения выходного канала,  $\nu$  – вязкость. Физические параметры жидкостей, вводимых в т-канал через 1 и 2 входной канал одинаковы. Общий расход задавался как:

$$Q_{in} = \frac{\rho Re \nu S}{2 Dh},$$

а расходы через 1 и 2 входные каналы задавался по формулам:

$$Q_1 = \frac{2}{1+R} Q_{in}, \quad Q_2 = \frac{2R}{1+R} Q_{in}.$$

Двухфазная среда рассматривалась как взаимопроникающий континуум с общим полем давления.

Были использованы следующие граничные условия: на стенках канала предполагалось выполнение условий непротекания; на входах канала задавались постоянные величины массового расхода, таким образом, чтобы отношение расходов в первом и втором

входном каналах имело конкретное значение; на выходе ставилось условие свободного истечения.

Верификация численных методов проводилась на основе экспериментальных данных, полученных методом цифровой трассерной визуализации в микроканале той же геометрии. При проведении экспериментальных исследований в поток жидкости добавлялись флуоресцентные трассерные частицы размером 2 мкм, поток освещался с использованием двухимпульсного Nd: YAG-лазера (длина волны 532 нм, длительность импульса 10 нс, энергия импульса 25 мДж) и переотраженный свет фиксировался CCD-камеры (глубина цвета 8 бит, разрешение матрицы  $2048 \times 2048$  пикселей). Для корректного расчета мгновенного поля скорости потока использовался кросс-корреляционный алгоритм с вытянутой вдоль потока расчетной ячейкой размера  $128 \times 64$  пикселя и 50% перекрытием [2]. Далее использовалась фильтрация по отношению сигнал/шум и медианный фильтр. Для расчета средней скорости потока использовались 3000 полей мгновенной скорости, что в дальнейшем использовалось в ходе моделирования гидродинамических процессов в микроканалах.

В результате исследований на карте режимов найдена область, в которой происходит частичное затекание жидкости в противоположный канал.

### Список литературы:

1. Моделирование течений в микромиксерах / В. Я. Рудяк, А. В. Минаков, А. А. Гаврилов, А. А. Дектерев // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17. – № 4. – С. 601-612. – EDN NRCQZL.
2. Kravtsova A., Ianko P., Meshalkin Y., Bilsky A. Influence of External Periodic Perturbation on the Flow in T-Microchannel // Abstracts. Part II International conference on the methods of aerophysical research (ICMAR), 13-19 august 2018, Novosibirsk, Russia.

*Выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.*

УДК 533.6.011.5

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НЕДОРАСШИРЕННЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА МЕТОДОМ ПРЯМОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кашковский А.В.<sup>1</sup>, Кудрявцев А.Н.<sup>1,2</sup>, Шершнев А.А.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Нерасчетные сверхзвуковые струи встречаются во многих технических приложениях – от ракетных двигателей до систем охлаждения микроэлектромеханических устройств. При исследовании их структуры и свойств широко используется численное моделирование. Как правило, моделирование выполняется на основе уравнений Навье-Стокса, работ посвященных исследованию струй разреженного газа, когда континуальный подход неприменим, существенно меньше. В настоящей работе мы используем метод прямого статистического моделирования (ПСМ), чтобы изучить влияние эффектов разреженности на структуру недорасширенных осесимметричных сверхзвуковых струй.

Численное моделирование выполнено с помощью кода SMILE-GPU, развитого в Лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН и позволяющего проводить расчеты методом ПСМ на вычислительных кластерах с графическими ускорителями. В расчетах использовано до 1 млрд пробных частиц. Моделировались струи одноатомного газа (аргона), истекающие из круглых сопел с числом Маха  $M_j=1.2$  и  $2.0$  при различной степени нерасчетности ( $n=4,8$ ) и различных значения числа Кнудсена  $Kn$ , определенного по диаметру сопла и длине свободного пробега молекул на его срезе. Наименьшее значение числа Кнудсена, при котором был выполнен расчет равнялось  $Kn=1.5 \times 10^{-3}$ , при этом значении эффекты разреженности заведомо малы. Расчеты проводились в достаточно большой области, размером  $40d \times 7.5d$ , где  $d$  – диаметр сопла. Для ускорения сходимости к струе был добавлен внешний спутный поток с числом Маха  $M_a=0.1$ .

По результатам расчетов определялись основные параметры стационарной ударно-волновой структуры нерасчетной струи, такие как максимальный радиус струи, размер первой бочки, положение и радиус диска Маха. Данные для малых чисел сравнивались с имеющимися в литературе, в частности взятыми из работ [1–3].

На рис. 1 показана полученная в расчете при малом числе Кнудсена первая бочка недорасширенной сверхзвуковой струи. Очевидно хорошее согласие с приведенными на том же рисунке данными других авторов.

Была исследована зависимость характеристик ударно-волновой структуры струи от числа Маха, степени нерасчетности и, наиболее подробно, от числа Кнудсена, изучено влияние эффектов разреженности.

Была также сделана попытка идентифицировать нестационарные эффекты, возникающие как результат развития гидродинамической неустойчивости струйного течения, инициированной всегда присутствующими, в силу статистического характера метода ПСМ, случайными флуктуациями газодинамических величин. Такие эффекты действительно наблюдались вдали от среза сопла, но они были значительно менее выражены, чем в случае расчетных (изобарических) струй.

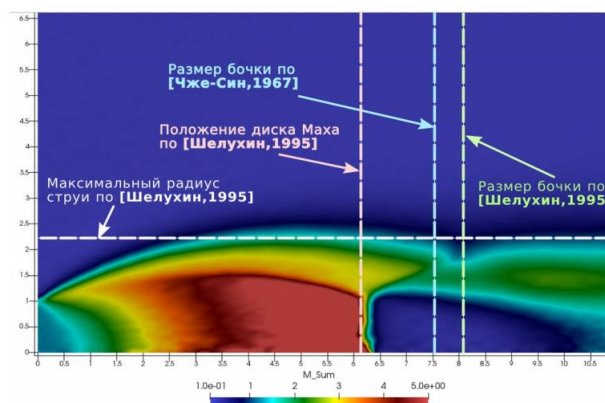


Рис. 1. Первая бочка круглой недорасширенной сверхзвуковой струи. Поле числа Маха. Расчет методом ПСМ,  $M_j = 1.2$   $n = 8$ ,  $Kn = 1.5 \cdot 10^{-3}$ .

### Список литературы:

1. Цзян Чже-Син. Исследование осесимметричной сверхзвуковой турбулентной струи при истечении из сопла с недорасширением // Исследование турбулентных струй воздуха, плазмы и реального газа / под ред. Г.Н. Абрамовича. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 144–181.
2. Шелухин, Н.Н. Исследование характеристик сверхзвуковой нерасчетной струи // Ученые записки ЦАГИ. 1995. Т. 26, №1-2. С. 78–87.
3. Анискин, В.М., Коратаева, Т.А., Ободовская, Е.А., Турчинович, А.О. Численное моделирование недорасширенных осесимметричных микроструй, истекающих в затопленное пространство // Доклады АН ВШ РФ. 2018. №1(38). С. 22–35.

Данная работа была поддержана грантом Российского научного фонда № 18-11-00246-П. Все расчеты проводились с использованием вычислительных ресурсов Центра коллективного пользования «Механика» (ИТПМ СО РАН).

УДК 536.25:551.2:551.14

**ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ ПЛЮМОВ, НЕ ВЫШЕДШИХ НА ПОВЕРХНОСТЬ И ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА ОБРАЗОВАНИЕ ХРЕБТОВ И ПОДНЯТИЙ****Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А., Непогодина Ю.М., Бородин А.В.**Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 3

Мантийные термохимические плюмы формируются на границе ядро-мантия при наличии теплового потока из внешнего ядра в локализованной области повышенной концентрации химической добавки, понижающей температуру плавления нижней мантии ниже температуры ядро-мантийной границы (границы 2900 км) [1, 2]. Примером мантийного термохимического плюма, действующего и в настоящее время, является Гавайский плюм, проявляющийся на поверхности Земли в виде Гавайско-Императорской вулканической цепи [3]. Теплообмен в канале плюма диаметром  $d$ , представляющем собой расплав, происходит в условиях свободной конвекции в неустойчиво стратифицированной по высоте вязкой жидкости.

Рассматриваются плюмы, не вышедшие на поверхность Земли. Такие плюмы останавливаются в земной коре или в литосфере и не достигают земной поверхности. Теплообмен между каналом плюма и окружающим массивом мантии характеризуется критерием  $Ka=N/N_1$ , где  $N$  – тепловая мощность, передаваемая от подошвы плюма в его канал,  $N_1$  – тепловая мощность, передаваемая от канала плюма в окружающую мантию в режиме стационарной теплопроводности. Плюмы, не вышедшие на поверхность, имеют  $Ka < 1.15$  [4]. На основе экспериментального и теоретического моделирования представлена структура свободно-конвективных течений по высоте канала плюма. Канал плюма представляет собой систему конвективных ячеек, разделенных областями сужения. Массив над кровлей плюма рассматривается в приближении высоковязкой ньютоновской жидкости. Вследствие воздействия сверхлитостатического давления на кровлю плюма возникает течение в массиве над кровлей плюма и формируется поднятие земной поверхности. Для различных моментов времени рассчитана высота поднятия, образовавшегося над плюмом, в зависимости от горизонтальной координаты при различной глубине расположения кровли плюма  $X=30, 100, 150$  км. Представлены скорости течения в массиве над кровлей плюма и скорости поднятия дневной поверхности во времени. Сделаны оценки максимальной высоты поднятия над отдельными плюмами при различной тепловой мощности на подошве плюма. Оценено влияние вязкости и коэффициента теплового расширения на предельную высоту поднятия над плюмом. Для линейного расположения группы плюмов исследовано влияние расстояния между плюмами на структуру поднятия, возникающего на поверхности на оси главного хребта, и на структуру хребтов, нормальных к оси главного хребта.

Представлено поднятие земной поверхности для различных моментов времени и глубин расположения кровли плюма  $X$ . Определены характерные горизонтальные размеры основной части поднятия  $y_1$ , где угол

наклона поверхности склона наибольший и слабо изменяется от  $y_1$ . Наблюдается линейная зависимость  $y_1=2X$ . С увеличением глубины расположения кровли плюма увеличивается горизонтальный размер поднятия. Для высоты поднятий 5–6 км оценена величина коэффициента теплового расширения  $\beta=1.1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и коэффициента динамической вязкости  $\eta=7 \times 10^{20} - 10^{21} \text{ (Н}\cdot\text{с)/м}^2$ . Представлены профили поднятий в вертикальной плоскости, проходящей через главный хребет. Эти профили получены при линейном расположении осей каналов плюмов и различных расстояниях между осями каналов  $\Delta y$ . Обнаружено, что при  $\Delta y < y_1$  высота главного хребта постоянная. Полученные оценки структуры поднятий и скорости их образования согласуются с геологическими данными для Кавказа и Тибета.

Определены профили поднятия в вертикальной плоскости, нормальной к главному хребту, в различных сечениях. Обнаружено существование хребтов, нормальных к главному хребту. Число таких хребтов соответствует количеству термохимических плюмов, ответственных за образование поднятия. Эти хребты образуются в процессе образования поднятия. При  $\Delta y > y_1$  распределение высот для главного хребта имеет пилообразный характер.

На основе анализа теплообмена сделан вывод о связи деятельности семейств плюмов, не достигших дневной поверхности, с существованием горячих полей – обширных областей повышенного теплового потока на поверхности. Найдены зависимости высоты и скорости подъема температурного фронта над кровлей плюма от времени. Локальное повышение удельного теплового потока на поверхности поднятия может указывать на то, что достигнута предельная высота поднятия.

## Список литературы:

1. Кирдяшкин А.А., Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г. Термохимические плюмы // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 9. С. 1057–1073.
2. Dobretsov N.L., Kiryashkin A.A., Kiryashkin A.G., Vernikovskiy V.A., Gladkov I.N. Modelling of thermochemical plumes and implications for the origin of the Siberian traps // Lithos. 2008. V. 100. P. 66–92. doi: 10.1016/j.lithos.2007.06.025.
3. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “ГЕО”, 2001. 409 с.
4. Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г., Дистанов В.Э., Gladkov I.N. Геодинамические режимы мантийных термохимических плюмов // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 6. С. 1092–1105.

*Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.*

УДК 536.24

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕТА МИКРОКАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НАД ЛИНИЕЙ КОНТАКТА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ, НАГРЕВАЕМОЙ СНИЗУ

Кириченко Е.О., Кириченко Д.П., Зайцев Д.В., Кабов О.А.

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

Микрокапли жидкости являются важным элементом в широком спектре технических задач, таких как струйная печать, распыление пестицидов, микро- и нанопроизводство, тонкопленочные покрытия, а также охлаждение микроэлектроники и силовых электронных устройств. Эффективными, для отведения высоких плотностей теплового потока являются системы с использованием газочапельных потоков или спреев. Явление левитации капель при достаточно невысоких температурах, может оказывать существенное влияние на эффективность работы систем охлаждения. Явление левитации микрокапель вблизи поверхности нагретой жидкости впервые качественно было описано Шефером в 1971 году [1]. 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 двигаются вниз под действием силы тяжести. В какой-то момент поток Стефана уравновешивает гравитацию, и капли в конечном итоге левитируют над поверхностью, часто создавая большие упорядоченные массивы, перемещающиеся по поверхности случайным образом. В работе [2] была впервые показана возможность левитации упорядоченного монослоя микрокапель над сухой нагреваемой поверхностью, недогретой до температуры насыщения. При переходе через контактную линию капли резко подлетают на высоту до 100 мкм, это, означает, что в области контактной линии существует область высокоинтенсивного испарения.

В данной работе исследуются траектории микрокапель, пролетающих над линией контакта, в зависимости от размера микрокапли.

Рабочий участок представляет собой пластину из нержавеющей стали с медным нагревателем 10x10мм, где формируется тонкий слой жидкости порядка 0,5мм, в качестве рабочей жидкости используется вода. На поверхности нагревателя вручную формируется сухое пятно. Монослой левитирующих микрокапель жидкости образуется над слоем жидкости и переходит на сухую поверхность. Процесс перелета микрокапель фиксируется с помощью высокоскоростной камеры FASTCAM SA1.1 (5400 к/с) с оптическим разрешением до 0,78 мкм/пиксель.

Эксперимент проводился при температуре нагревателя  $T=92^{\circ}\text{C}$ . Температура поверхности контролируется с помощью 7 термопар. Исследовались траектории микрокапель с диаметрами 10,1 мкм, 10,9 мкм, 12,5 мкм, 13,2 мкм, 14,8 мкм и 16,3 мкм.

На графике 1 показан перелет микрокапель разного диаметра при одинаковой температуре подложки

$T=92^{\circ}\text{C}$ . Справа на графике слой жидкости, слева сухая поверхность, контактная линия находится в начале координат. Фото процесса перелета с высокоскоростной камеры представлено на рисунке 2.

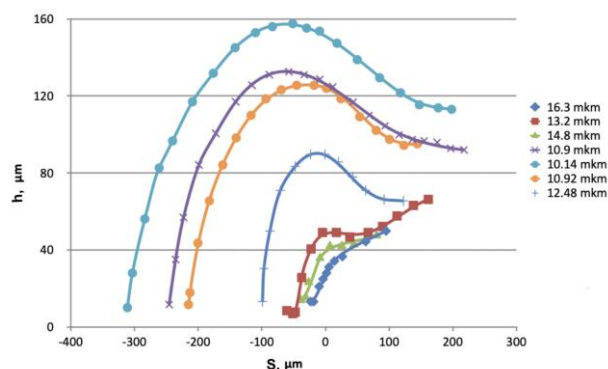


Рис. 1. Перелет микрокапель через контактную линию.

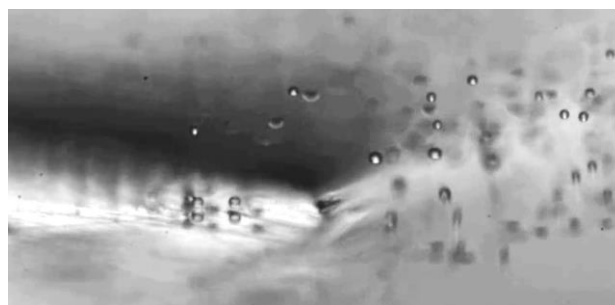


Рис. 2. Фото перелета микрокапель через контактную линию при  $T=92^{\circ}\text{C}$ .

При приближении микрокапли к контактной линии траектория капли отклоняется вверх из-за попадания в область интенсивного испарения. Т. е. локальная скорость потока газа увеличивается и увеличивается результирующая сила, действующая на каплю. Чем меньше диаметр капли, тем выше проходит ее траектория. Также при уменьшении диаметра капли увеличивается расстояние от точки приземления до контактной линии. Виден сдвиг максимума подъема при изменении диаметра капли.

### Список литературы

- Schaefer VJ. 1971. Observations of an early morning cup of coffee. Am. Sci. 59:534–35.
- Dmitry V. Zaitsev, Dmitry P. Kirichenko, Vladimir S. Ajaev, and Oleg A. Kabov. 2017 Levitation and Self-Organization of Liquid Microdroplets over Dry Heated Substrates. Phys. Rev. Lett. 119, 094503.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта с ИТ СО РАН (121031800213-0).

УДК 532.54+532.22

## СОУДАРЕНИЕ МИКРОЧАСТИЦЫ АЛЮМИНИЯ С ПРЕГРАДОЙ ИЗ ТИТАНА ПРИ УСЛОВИЯХ ХГН

Киселев С.П., Киселев В.П.

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

В настоящее время для нанесения покрытий на металлические поверхности широко используется метод холодного газодинамического напыления (ХГН) [1]. В этом методе металлические микрочастицы разгоняются в сопле Лавала до скорости выше 500 м/с, при их соударении с преградой возникает прочное покрытие. Имеется большое число работ по анализу механизма возникновения прочной связи (адгезии) между частицей и преградой при их соударении [2]. Однако в настоящее время механизм возникновения адгезии при ХГН не выяснен до конца.

В данной работе представлены результаты численного моделирования методом SPH соударения микрочастицы алюминия (Al) диаметром  $d = 20$  мкм с преградой (пластиной Ti) со скоростью  $v_p = 550$  м/с. Деформация Al и Ti рассчитывалась в рамках упругопластической модели Прандтля – Рейса.

Метод SPH (SPH – гладкие частицы в гидродинамике) является лагранжевым методом расчета движения сплошных сред с большими деформациями. В работе использована версия SPH для расчета осесимметричного деформирования упругопластического материала, в которой учитывалась зависимость предела текучести от температуры, деформации и скорости деформации [3]. В данной работе произведено обобщение методики [3], позволяющее учитывать в расчете контактные границы и теплопроводность материалов.

На рис. 1 (а) показано распределение рассчитанной температуры в микрочастице Al и преграде Ti в момент времени  $t = 20$  нс. В этот момент температура достигает максимальных значений  $T \approx 420^\circ\text{C}$  в Al вблизи контактной границы с Ti в кольцевом слое  $8 \text{ мкм} < r < 12 \text{ мкм}$ . Нагрев материала Al происходит за счет работы касательных напряжений на пластической деформации сдвига, которая локализуется в узком слое вблизи поверхности контакта. Как видно из рис. 1 (б), расчет без учета теплопроводности приводит к завышенному (на  $\Delta T \approx 200^\circ\text{C}$ ) значению максимальной температуры. Это связано с тем, что слой локализованной деформации является тонким  $h \approx 1 \text{ мкм}$ , поэтому характерное время отвода тепла из нагретого слоя  $\tau' \approx h^2 / \chi \approx 11 \text{ нс}$ , где  $\chi \approx 0.88 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  – коэффициент температуропроводности Al. Расчеты показывают, что время соударения микрочастицы Al с преградой составляет порядка  $t \approx 40 \text{ нс}$ . За это время температура в горячем слое Al понижается на  $\Delta T \approx 100^\circ\text{C}$ . Предел текучести в Ti в 6 раз больше предела текучести в Al, поэтому при соударении в

пластине Ti не возникают большие пластические деформации и не происходит значительного нагрева Ti. Коэффициент температуропроводности Ti на порядок меньше чем в Al, поэтому пластина Ti остается холодной (см. рис. 1).

Представленные результаты расчетов позволяют предположить следующий механизм возникновения адгезии между микрочастицей Al и преградой Ti. Известно [4], что при критической температуре нагрева  $T_* \approx 327^\circ\text{C}$  в системе многослойных биметаллических пленок Ti-Al начинается реакция самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В результате реакции на границе между Ti и Al образуется интерметаллид  $\text{TiAl}_3$ . При соударении микрочастицы Al с преградой Ti, температура на контактной границе ( $T \approx 420^\circ\text{C}$ ) превышает критическое значение ( $T_* \approx 327^\circ\text{C}$ ). Кроме того, при соударении действует значительные сжимающие напряжения. В этих условиях возможно возникновение на контактной границе Ti-Al реакции СВС, в результате которой возникнет интерметаллид  $\text{TiAl}_3$ . Поскольку часть этого интерметаллида будет находиться в микрочастице Al, а другая часть в пластине Ti, то  $\text{TiAl}_3$  будет обеспечивать возникновение прочного соединения между микрочастицей и преградой при соударении.

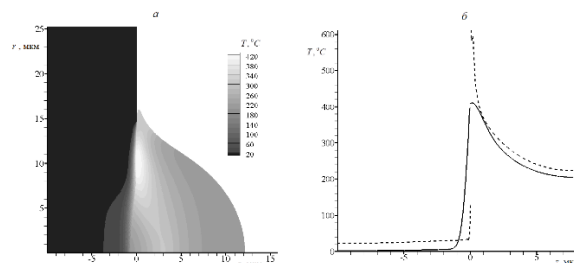


Рис. 1. Температура микрочастицы Al и пластины Ti в момент времени  $t = 20$  нс : а –  $T(r, z)$ ; б –  $T(z)$  при  $r = 9$  мкм, сплошная линия – с учетом, штриховая линия – без учета теплопроводности.

### Список литературы:

1. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В. Гетерогенные технологии: проблемы взаимодействия частиц с преградой // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 3. С. 415–432.
2. Schmidt T., Assadi H., Gartner F., et al. From particle acceleration to impact and bonding in cold spray // J. of Thermal Spray Technology 2009. V. 18, N 5-6. P. 794–808.
3. Yang G., Han X., Hu D.A. Simulation of explosively driven metallic tubes by the cylindrical smoothed particle hydrodynamics method. // Shock Waves. 2015. V. 25. P. 573–567.
4. Рогачев А.С., Григорян А.Э., Илларионова Е.В., и др. Безгазовое горение многослойных биметаллических пленок Ti/Al // ФГВ. 2004. Т. 40, № 2. С. 45–51.

УДК 536.24

## ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ КОНВЕКЦИИ НА ФОРМЫ ФРОНТОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В МЕТОДАХ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Кислицын С.А.<sup>1</sup>, Бердников В.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Высококачественные монокристаллы различного назначения выращивают в большинстве случаев из расплавов методами направленной кристаллизации. К наиболее часто используемым относятся варианты методов Чохральского, Бриджмена-Стокбаргера и горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК) [1–4]. Эти методы отличаются направлениями градиентов температуры и направлениями продвижения фронтов кристаллизации относительно вектора силы тяжести. Это влияет на особенности гидродинамики и сопряженного конвективного теплообмена в режимах термогравитационной, тепловой гравитационно-капиллярной и смешанной конвекции. Два первых типа режимов характерны для метода ГНК в зависимости от граничных условий на верхней границе слоя расплава, соответственно жесткой или свободной. В классическом варианте метода Чохральского для управления гидродинамикой используется вращение кристаллов при неподвижном тигле. В методе Бриджмена используется вращение тигля. Проблема выбора оптимальных технологических режимов частично сводится к определению режимов течения и определению границ ламинарно-турбулентных переходов. От амплитудно-частотных характеристик пульсаций температуры и локальных тепловых потоков у фронта кристаллизации зависит кристаллографическое совершенство затвердевающего вещества.

Численно исследован нестационарный сопряженный конвективный теплообмен в методе ГНК и его влияния на форму фронта кристаллизации гептадекана без эффектов инверсии и на воде с влиянием инверсной зависимости плотности расплава от температуры. Исследования проведены со слоями жидкостей со свободной верхней границей. Исследован процесс кристаллизации воды со свободной верхней границей и в слоях различной толщины от 12,5 мм до 50 мм. В режиме тепловой гравитационно-капиллярной конвекции рост слоя льда на охлаждаемой вертикальной стенке в слое толщиной 12,5 мм происходит вначале монотонно. Затем течение теряет устойчивость и на границе встречных потоков возникает система дрейфующих вихрей. Поле температуры становится нестационарным и на фронт кристаллизации натекает поток нагретой жидкости с пульсирующей температурой. На фронте наблюдается периодическая кристаллизация и плавление. При увеличении высоты слоя до 25 мм неустойчивость течения на границе двух встречных потоков исчезла. Вблизи нижней части фронта кристаллизации образуется конвективная ячейка, как в слое толщиной 50 мм. Физическая причина заключается в накоплении достаточной массы воды с температурой от 0 до +4°C в придонной части слоя вблизи

фронта кристаллизации. В нижней части у фронта возникает восходящий поток холодной жидкости. А в верхней части на фронт натекает поток нагретой жидкости. Влияние термокапиллярного эффекта состоит в том, что формируется компактный поток нагретой жидкости, натекающий на фронт кристаллизации вдоль свободной поверхности. В результате локально резко замедляется рост кристалла. Результаты расчетов гидродинамики и ее влияния на эволюцию формы фронта кристаллизации во времени соответствуют наблюдаемым в физическом эксперименте. Результаты численного моделирования существенно дополняют эксперимент в части распределений температуры в жидкости и в твердом теле на разных этапах роста кристалла.

Численно исследованы процессы кристаллизации кремния и воды на монотонно охлаждаемом диске. Определена зависимость формы фронтов кристаллизации от режимов теплообмена через фиксированные интервалы времени после включения охлаждения диска. Исследования проведены в нестационарных режимах термогравитационной, тепловой гравитационно-капиллярной и гравитационно-центробежной конвекции. Начальный перегрев расплава кремния относительно температуры кристаллизации составлял 10 К. Скорость монотонного охлаждения диска 2 К/мин. В нестационарных режимах смешанной конвекции при радиусе диска 2 см и при скоростях вращения кристалла до 20 об/мин наличие термокапиллярного эффекта существенно влияет на теплообмен и форму фронта кристаллизации. В случае воды инверсная зависимость плотности от температуры существенно влияет на формы фронта кристаллизации. Полученные результаты могут быть полезны при выращивании монокристаллов эвтектики кадмий-ртуть-теллур.

### Список литературы:

1. Wilke K.-Th. Kristallzüchtung. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1973. 600 p.
2. Müller G. Convection and inhomogeneities in crystal growth from the melt. Berlin: Springer-Verlag. 1988. 150 p.
3. Багдасаров Х.С., Горяинов Л.А. Тепло- и массоперенос при выращивании монокристаллов направленной кристаллизацией. М.: Физматлит, 2007. 224 с.
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.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН 0257-2021-0003, номер гос. регистрации 121031800213-0.*

УДК 536.24

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ ВОДЫ НА ФОРМЫ ФРОНТА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛЬДА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКИ ПОЛОСТИ****Кислицын С.А., Михайлов А.В., Золотухина О.С.**<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Численно и экспериментально проведены исследования процесса кристаллизации воды в прямоугольной полости при охлаждении вертикальной стенки ниже температуры кристаллизации. Изучена эволюция формы течения и ее влияние на форму фронта кристаллизации, в зависимости от высоты слоя воды и значений перепадов температуры между вертикальными стенками. Дополнительно численно проведено моделирование при различных краевых условиях на верхней границе слоя жидкости, в том числе учитывался термокапиллярный эффект. Рабочий участок экспериментального стенда состоит из полости размером  $105 \times 105 \times 30$  мм<sup>3</sup>, две торцевые стенки которой являются теплообменниками. Перед началом эксперимента полость заполняется водой до нужной высоты слоя. Через теплообменники прокачивается термостатированная жидкость. Рабочий перепад температуры между боковыми стенками полости определяется с помощью термодатчиков, установленных на стенках теплообменников. Форма течения в эксперименте снималась цифровой видеокамерой. Течение воды визуализировалось полиамидными частицами-трассерами в тонком подсвечиваемом слое. Численные расчеты выполнены с использованием метода конечных элементов [1]. Решались нестационарные уравнения свободной конвекции для жидкости и уравнение теплопроводности для кристалла льда в двумерной сопряженной постановке в терминах температура, функция тока и вихрь скорости. Использовались треугольные сетки, адаптирующиеся под изменяющееся положение фронта кристаллизации. Сетка сгущается ко всем границам, включая границу раздела кристалла и расплава. Теплота кристаллизации учитывалась через внутренний источник энергии. Границы зоны учета теплоты кристаллизации определялись в итерационном процессе решения уравнений внутри временного шага. Данный метод подходит как для учета выделения тепла при кристаллизации, так и поглощения его при плавлении. Сходимость численного метода учета теплоты кристаллизации подтверждена сравнением с аналитическим решением задачи Неймана для полуграниченной области [2]. Вода обладает инверсной зависимостью плотности от температуры [3]. Аналогичной зависимостью обладает расплав кадмий-ртуть-теллур [4, 5], кристаллы которого широко применяются в оптической технике, работающей в ИК-диапазоне [6]. В эксперименте кристаллизация начинается после значительного переохлаждения слоя воды в пристеночной области. В начале процесса

кристаллизации наблюдается резкий рост температуры из-за выделения теплоты кристаллизации. Возможно формирование мелких кристаллов льда, в объеме переохлажденной воды, которые уносятся потоком жидкости и расплавляются. При численном моделировании кристаллизация начинается при охлаждении воды ниже температуры кристаллизации. В ходе исследований показано, что форма фронта кристаллизации в значительной степени зависит от взаимного расположения двух конвективных ячеек. В одной происходит всплытие более охлажденной воды, и средняя температура ниже температуры точки инверсии плотности, в другой всплывает более нагретая вода, и средняя температура выше. И численно и экспериментально показано, что, как изменение высоты слоя жидкости, так и изменение значения температуры, поддерживаемое на “горячей” стенке, могут приводить к качественному изменению формы фронта кристаллизации. С помощью метода PIV (Particle Image Velocimetry) получены поля скорости и профили компонент скорости в жидкости при физическом моделировании. Численные расчеты дополняют экспериментальные результаты данными об эволюции полей температуры в жидкости и в кристалле.

Полученные результаты могут быть полезны при выращивании кристаллов методом горизонтальной направленной кристаллизации [7] из расплавов обладающих инверсной зависимостью плотности от температуры.

**Список литературы:**

1. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач / Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г., Новосибирск: НГТУ, 2007. 896 с.
2. Conduction of heat in solids / H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, Oxford At The Clarendon Press, 1959. 510 p.
3. Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до 100°C / М.: Издательство стандартов, 1978. 6 с.
4. V.M. Glazov, L.M. Pavlova Liquefaction phenomena in CMT melts and structural features in cadmium and mercury tellurides in a liquid phase // Journal of Crystal Growth 184/185 (1998) 1253–1261.
5. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications / P. Capper, J. Garland, John Wiley & Sons Ltd, 2011. 556 p.
6. Н. Кульчицкий, А. Наумов, В. Старцев Охлаждаемые фотоприемные устройства ИК-диапазона на кадмий-ртуть-теллуре: состояние и перспективы развития // Электроника НТБ. 2020. № 6. С. 114–121.
7. Тепло- и массоперенос при выращивании монокристаллов направленной кристаллизацией / Багдасаров Х.С., Горяинов Л.А., М.: Физматлит, 2007. 224 с.

*Исследования выполнены в рамках  
молодежного научно-исследовательского  
проекта ИТ СО РАН 2021г.*



УДК 662.612

## ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ДИФФУЗИОННОЙ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА РАЗНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАСШТАБАХ

Клюев А.Ю., Гурьянов А.И.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,  
152934, Россия, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Организация горения в сложных технических системах требует учета множества факторов, таких как: обеспечение устойчивости пламени в широком диапазоне режимов, соблюдение экологических норм, обеспечение высокой эффективности преобразования химической эксергии и др. Одним из перспективных направлений развития камер сгорания газотурбинных двигателей и энергетических устройств сжигания является разделение зоны реакции и фронта пламени на множество мелких зон и локальных фронтов пламени в них. Такой принцип организации горения получил название микрофакельной технологии сжигания. Создание расчетных моделей и инженерных методов проектирования горелочных модулей камер сгорания, работающих с применением этой технологии, требует учета влияния масштабного фактора на процесс горения. Доступный в литературе массив расчетных и экспериментальных данных по изучению его влияния на локальные и интегральные параметры реагирующего течения часто носит противоречивый характер.

$$Re = \frac{wd}{\nu}; \quad (1)$$

В работе исследовано влияние масштабного фактора на горение реагирующих коаксиальных диффузионных струй, протекающее на трех пространственных масштабах. Характерные размеры диаметров топливных сопел расположенных на оси струи составляют:  $10^{-2}$  м,  $5 \times 10^{-3}$  м,  $10^{-3}$  м,  $5 \times 10^{-4}$  м,  $10^{-3}$  м. Окисли-

тель (воздух) подавался через кольцевой канал, площадь которого в 35 раз превышает площадь топливного сопла. Истечение компонентов топлива и окислителя происходило в атмосферу с давлением 101325 Па и температурой 300 К. Исследование проводилась на семи режимах по числу Рейнольдса (1) в диапазоне от 15 до 3000.

$$Fr = \frac{w^2}{gd}; \quad (2)$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta Td^3}{\nu a}; \quad (3)$$

Получены распределения профилей температуры и безразмерной скорости по относительному радиусу струй. Выполнена оценка влияния масштабного фактора на горение диффузионных коаксиальных струй.

Анализ полученных результатов показывает, что на режимах с числом Фруда  $Fr < 10^2$  (2) конвективные подъемные силы, определяемые числом Рэлея  $Ra > 10^3$  (3), вызванные градиентом плотностей, оказывают значительное влияние на перестройку структуры профилей температуры и безразмерной скорости. В остальных случаях наблюдается подобие профилей и равенство относительных значений скорости и температуры внутри газодинамического режима.

*Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы 0774-2020-0004; АААА-А20-120120790010-3).*

УДК 536.1

## ДВУХУРОВНЕВАЯ СВЯЗАННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО СИНТЕЗА КОМПОЗИТА

Князева А.Г., Анисимова М.А.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
630055, Россия, Томск, пр. Академический 2/4

В современных технологиях синтеза новых материалов, включая 3D технологии, довольно остро стоит проблема расширения спектра используемых композиций и прогнозирования состава, структуры и свойств продуктов синтеза (например, металломатричных композитов с упрочняющими включениями). Для решения этих проблем активно привлекают математическое моделирование с использованием как коммерческих программ, так и специально разрабатываемых довольно детальных моделей. Среди них большую роль играют мультифизическое моделирование и многоуровневые модели. Однако в приложении к процессам синтеза новых материалов, в том числе композитов с формированием упрочняющих частиц “in situ” комплексные связанные модели с прогностическими свойствами встречаются редко. В имеющихся же моделях редко обсуждается соответствие между масштабами и корректность переноса информации с одного уровня на другой, корректность вычислительных алгоритмов, требующих согласования масштабов как физических, так и геометрических.

В настоящей работе предлагается двухуровневый подход к построению моделей синтеза композитов на подложке в условиях управления процессом подвижным тепловым источником. В простейшем приближении подход аналогичен известным моделям синтеза в режиме горения и теплового взрыва с выделением условных реакционных ячеек. Этот подход активно развивался для бинарных систем, из которых один из компонентов является тугоплавким, а второй - легкоплавким.

Например, в системе Ti-Al, легкоплавким компонентом является алюминий, который после расплавления окружает частицы титана. Далее происходит образование растворов и интерметаллидов. В соответствии с равновесными диаграммами состояния, можно выделить соединения  $Ti_3Al$ ,  $TiAl$  и  $TiAl_3$ , которые характеризуются разными условиями стабильного существования в виде кристаллических фаз. В неравновесных же условиях последовательность выделения фаз неочевидна. Тем не менее, учитывая естественное физическое соотношение между характерными пространственными масштабами процессов теплопроводности и диффузии (которая является лимитирующей стадией фазообразования с участием твердых веществ), известный подход можно использовать для построения двухуровневой модели синтеза композита.

В результате двухуровневая модель включает теплофизическую задачу для макроуровня, в которой тепловыделение от химических реакций следует из решения задачи для мезоуровня. В свою очередь, задача для мезоуровня представляет собой основную мезо-

ячейку сферической формы, в центре которой расположена тугоплавкая частица. Реакции начинаются при достижении температуры плавления. Поскольку в условиях управляемого синтеза покрытий на подложках процесс развивается неоднородно, для каждой макроточки образца имеем отдельную задачу об определении состава при температуре, следующей из макрозадачи. В каждой мезо ячейке состав зависит от своей мезокоординаты. Переход на макроуровень осуществляется после осреднения концентраций компонентов и определения размеров областей, занятых фазами. Макроскопические теплофизические свойства считаются зависящими от состава. В результате двухуровневая модель становится полностью связанной. Дополнительно, зная состав в каждой точке образца и распределения концентраций по мезообъемам, можем оценить напряженно-деформированное состояние в каждой ячейке. Последующее осреднение после перехода от сферической системы координат к декартовой даст величины компонентов тензоров напряжений и деформаций второго рода на макроуровне. Напряжения первого рода, т.е. термические, можно определить из решения соответствующей задачи на макроуровне. Далее используется предположение об аддитивности вкладов напряжений разной физической природы в общее напряженно-деформированное состояние.

При численной реализации подобного подхода возникают ограничения на параметры разностной сетки как сверху, так и снизу, поскольку размер мезо ячейки по сути не может быть больше шага разностной сетки макрозадачи. В свою очередь, решение задачи для мезоуровня требует ограничения на параметры ячеек, связанные с физическими масштабами учитываемых процессов. Однако в простейшем приближении для качественного исследования предложенного двухуровневого подхода можно использовать приближенные аналитические оценки.

Еще одной проблемой при развитии двухуровневых подходов является необходимость построения новой мезозадачи при переходе к другим химическим системам, например при добавлении к смеси порошков титана и алюминия оксидов металлов, которые при взаимодействии с алюминием приводят к образованию упрочняющих частиц. В этом случае способ построения мезозадачи зависит от соотношения температур плавления реагентов и ожидаемых продуктов, а также от детальности описания.

В настоящей работе подход иллюстрируется на примере одномерной макрозадачи с подвижным внешним тепловым воздействием.

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда No 22-11-00100,  
<https://rscf.ru/project/22-11-00100>*

УДК 669.1

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ РЕАКЦИИ В ПОРОШКОВОЙ ПРЕССОВКЕ С ПОВЕРХНОСТИ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ РЕАКЦИОННОЙ ЯЧЕЙКИ

Князева А.Г., Букрина Н.В.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
630055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4

В настоящей работе предложен вариант двухуровневой модели синтеза композита из порошков в условиях нагрева с поверхности. Возможность разделения на макро- и мезоуровни связана с разными масштабами тепловых и диффузионных процессов, контролирующей скоростью химических реакций.

Решение задач такого типа для простых систем привело к появлению моделей с выделением реакционных ячеек [1]. В этих задачах изменение состава описывалось в соответствии с равновесными диаграммами состояния. Если в процессе принимают участие больше, чем два компонента, то требуется принимать во внимание дополнительные факторы.

Для исследования в работе выбраны смеси двух типов  $Al+Cr_2O_3+Ti$  и  $Al+Fe_2O_3+Ni$ . В каждой из них возможны реакции образования интерметаллидов и металлотермические реакции. В соответствии с теплотами образования оксидов, ожидается только одна реакция восстановления металла из оксида. В каждой из выбранных типов смесей алюминий тратится как на образование частиц, так и на образование матрицы, и один из промежуточных продуктов реакции восстановления участвует в образовании конечного продукта. Согласно подходу, описанному в [2], для данных систем предложена реакционная схема, состоящая из двух суммарных реакций. В результате первой реакции образуются частицы оксида алюминия. Во второй реакции один из промежуточных продуктов реакции восстановления участвует в образовании конечного продукта, что приводит к формированию матрицы сложного состава.

Диффузионно контролируемый процесс восстановления одного металла другим из оксида описывается в рамках задачи с подвижными границами, которая решается аналитически в квазистационарном приближении. Формирование состава матрицы также происходит по диффузионному механизму. Химические реакции в первом приближении не анализируем. Зная положение границ раздела фаз, находим относительные объемные доли оксидных фаз и долю объема, занимаемую матрицей.

Чтобы учесть процессы, протекающие на мезоуровне и для оценки изменения состава в точках макрообразца с течением времени, выделим ячейку сферической формы так, чтобы в ее центре находилась тугоплавкая частица исходного оксида  $Cr_2O_3$  (рис. 1 область 1). До стадии активного фазообразования частицу окружает расплав  $Al$ ,  $Ti$  (рис. 1 область 4). В этом случае средний состав ячейки будет давать концентрацию элементов и фаз на макроуровне в начальный момент времени. В последующие моменты времени состав ячейки изменяется.

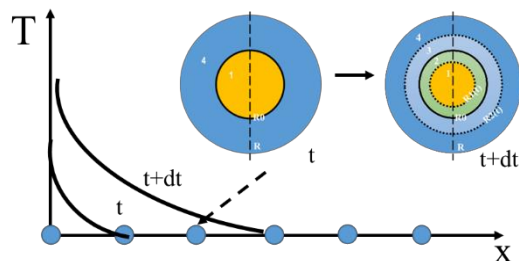


Рис. 1. Пояснение к постановке задачи.

Макрозадача об определении температурного поля образца решается в одномерной постановке. Изменение долей фаз позволяет рассчитать это суммарное тепловыделение в реакциях в каждой точке образца.

Так как температура в каждой ячейке образца есть температура в каждой точке макрообразца, то обе задачи решаются совместно. Прогрев в точках, находящихся на разном расстоянии от внешней поверхности, наблюдается в разное время, поэтому и состав в исследуемом образце изменяется постепенно.

Задача решается численно в безразмерной постановке. Выделены безразмерные комплексы физических величин. Произведена оценка этих параметров и найдена область их изменения. Установлены условия корректности предложенного подхода из сравнения временных и пространственных масштабов тепловых и диффузионных явлений.

Разработан численный алгоритм для совместного решения задач макро- и мезоуровней. Предложенный алгоритм позволяет исследовать динамику изменения состава во всех точках. Дополнительно к традиционным моделям, двухуровневая модель позволяет рассчитать в каждой точке как объемные доли фаз, так и состав матрицы (распределение концентраций в реакционной ячейке). Модель дополняется расчетом напряжений и деформаций по данным об изменении состава и температуры.

### Список литературы:

1. Ковалев О.Б., Беляев В.В. Математическое моделирование металлургической реакции в двухкомпонентной реагирующей дисперсной смеси // ФГВ. 2013. Т. 49. № 5. С. 64.
2. Knyazeva A.G., Bukrina N.V. A coupled model of composite synthesis in combustion regime // Combustion theory and modelling. 2022. V. 26 I. 1. P. 152-178.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-03-00303.

УДК 532.66

## ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ ФАЗ НА ДИНАМИЧЕСКИЙ КОНТАКТНЫЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ В МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПОТОКАХ ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ

Ковалев А.В.<sup>1,2</sup>, Ягодницына А.А.<sup>1,2</sup>, Бильский А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

В микроканальных потоках несмешивающихся жидкостей важную роль играют силы, связанные с поверхностными явлениями, такими как образование межфазных поверхностей и линий трёхфазного контакта (в случае потоков жидкость-жидкость контакта двух несмешивающихся жидкостей и твёрдой стенки). Образование контактных линий определяется смачиваемостью поверхности, которая описывается таким параметром, как контактный угол смачивания. В общем случае контактный угол смачивания зависит от скорости движения контактной линии [1].

Различная смачиваемость стенок микроканала несмешивающимися жидкостями может приводить к качественным изменениям в режимах течения и структуре потока [2]. Так, вместо кольцевого режима появляются ручейковый и параллельный, а в случае снарядного режима дисперсная фаза смачивает стенки, образуя контактную линию и мениск. Данная работа посвящена изучению зависимости контактного угла от скорости движения контактной линии в микроканальных потоках жидкость-жидкость.

Контактный угол измерялся по менискам, образованным межфазной поверхностью снарядов дисперсной фазы (см. рис. 1). Направление движения контактной линии было выбрано положительным для натекающих контактных углов, и отрицательным для оттекающих.

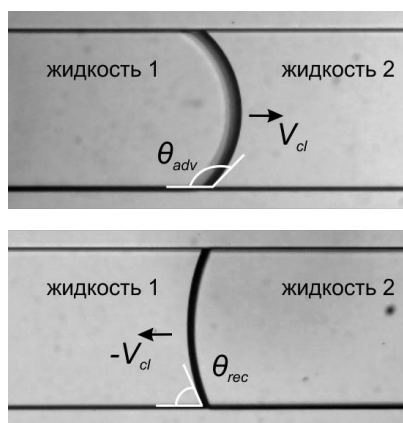


Рис. 1. Схема измерения натекающего  $\theta_{adv}$  и оттекающего  $\theta_{rec}$  контактных углов смачивания.

В работе использовались микроканалы прямоугольного сечения  $200 \times 400$  мкм, все внутренние стенки которых были выполнены из фоторезиста SU-8. Расход и давление в микроканальной системе задавались контроллером давления Elveflow OB1 с подключенными кориолисовыми расходомерами BFS mini CORI-FLOW. В качестве рабочих жидкостей использовались водоглицериновые растворы, пропиленгликоль и парафиновое масло.

Обнаружено, что гистерезис контактного угла, определяемый как разница натекающего и оттекающего углов  $\theta_{adv} - \theta_{rec}$  не зависит от вязкостей жидкостей при скорости контактной линии, стремящейся к нулю. Однако зависимости углов от скорости движения контактной линии могут существенно различаться для жидкостей разной вязкости, при этом наиболее явно влияет вязкость жидкости-предшественника (см. рис. 2).

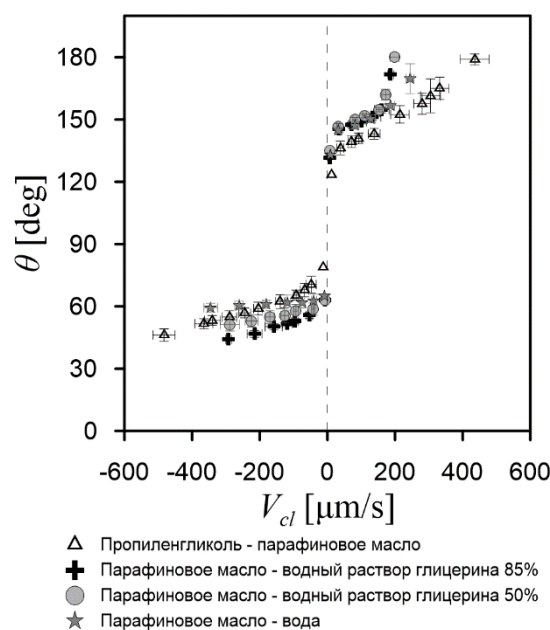


Рис. 2. Зависимости контактных углов от скорости движения контактной линии, наборы жидкостей записаны в формате несущая фаза – дисперсная фаза.

Таким образом, разница  $\theta_{adv} - \theta_{rec}$  имеет зависимость от скорости, и соответствующий график оказывается несимметричным (см. рис. 2). Данный факт не совпадает с результатами, полученными на основе молекулярно-кинетического подхода [1], и требует дальнейшего изучения.

### Список литературы:

1. Hydrodynamics of Wetting / S.F. Kistler; Edit. J. Berg, Wettability, Surfactant Science Series, Vol. 49, CRC Press, New York, 1993, pp. 311–429.
2. B. M. Jose and T. Cubaud Formation and dynamics of partially wetting droplets in square microchannels // RSC Advances 2014, 4, 29, 14962–14970.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 621.18: 697.326

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ТОПЛИВА

Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Генералов Д.А., Бусыгин С.В., Карпов Д.А.

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

Характер процесса горения топлива и его результаты зависят от условий, в которых протекают реакции горения. При организации режима работы топочных устройств энергетических установок требуется организовать влияние процессов тепло- и массообмена, аэродинамики на протекающие химические реакции таким образом, чтобы обеспечить наиболее полное и экологически чистое сжигание топлива.

Проведение испытаний является длительной процедурой. В этой связи применение специализированных математических моделей и разработанных на их основе программно-информационных комплексов позволяет моделировать оптимальные режимы работы энергетических установок с учетом режимных мероприятий, применения комбинированных топлив, а также реконструкции горелочных и топочных устройств.

При использовании природного газа в качестве основного топлива в энергетических установках основным загрязняющим веществом выступают термические оксиды азота, интенсивность образования которых определяется температурой в зоне активного горения.

Воздействовать на степень недожога топлива возможно при применении различных типов горелочных устройств и амбразур. Одним из наиболее эффективных способов снижения выбросов  $\text{NO}_x$  является рециркуляция дымовых газов в горелку.

Для численного моделирования горения углеводородного топлива была выбрана мультидисциплинарная платформа STAR-CCM+, поскольку она позволяет решать задачи по моделированию турбулентных течений с учетом химии реагирующих потоков. Это дает возможность выявлять и анализировать взаимосвязь между производительностью котельной установки и эмиссией загрязняющих веществ при различных эксплуатационных режимах. Проведено математическое моделирование и численное исследование процессов сгорания с целью выявления наиболее оптимального режима горения с точки зрения сокращения эмиссии  $\text{NO}_x$  с помощью рециркуляции дымовых газов. Была построена трехмерная модель горелки ГМУ-45, применяемая на энергетических котлах типа ТГМЕ-464. Данные котлы являются базовыми на таких электростанциях, как, Ульяновская ТЭЦ-1, Чебоксарская ТЭЦ-2 и пр. Была построена расчетная сетка с количеством элементов 2 787 464. Для моделирования были заданы параметры для паровой нагрузки котла равной 400 т/ч. Моделирование проводилось при степени рециркуляции 8, 10 и 15 % (рис. 1).

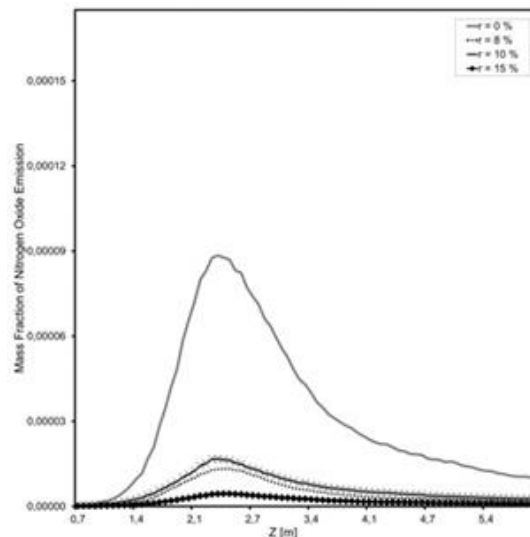


Рис. 1. Результаты моделирования.

Установлено, что наибольшее сокращение эмиссии достигается при степени рециркуляции 15 %. Эффективность возрастает по мере увеличения доли подаваемого рециркулирующего газа, которая для данного типа котлов ограничивается производительностью дутьевого вентилятора. Дальнейшее сокращение эмиссии  $\text{NO}_x$  становится возможным за счет реализации реорганизации степени рециркуляции по ярусам горелок без изменения общей ее доли.

На основании результатов моделирования предложены технические решения, направленные на сокращение эмиссии  $\text{NO}_x$ .

### Список литературы:

1. Таймаров М.А., Ахметова Р.В. и др. Сжигание метано-водородной фракции и мазута в котлах ТГМ-84А // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2016. № 4. С. 83-95.
2. Пат. 208400 Российская Федерация, МПК F 32 D 17/00 (2006.01), F 32 L 7/00 (2021.08). Горелка биогазовая с рециркуляцией / В. Н. Ковальногов, Р.В. Федоров, Д.А. Генералов, А.В. Чукалин, Д.В. Степушин; заявитель и патентообладатель УлГТУ. – № 2021122760; заявл. 29.07.21 ; опубл. 16.12.21, Бюл. № 35
3. Пат. 208401 Российская Федерация, МПК F 32 D 17/00 (2006.01). Газомазутная горелка с изменяемой формой амбразуры / В. Н. Ковальногов, Р.В. Федоров, Д.А. Генералов, А.В. Чукалин, Н.В. Мекеров; заявитель и патентообладатель УлГТУ. – № 2021122763; заявл. 29.07.21 ; опубл. 16.12.21, Бюл. № 35

*Работа выполнена при поддержке мегагрантом Правительства Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-584.*

УДК 53.043

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЕТРА В ПРИЗЕМНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НАД ВОДОЕМОМ

Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Чукалин А.В., Петров А.В.

Ульяновский государственный технический университет,  
432027, Россия, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

Эффективность ветроэнергетических установок большой мощности напрямую зависит от высоты, а также теплофизических и динамических свойств приземного пограничного слоя атмосферы. Ветроэнергетические установки, расположенные рядом с водоемами больших площадей, обладают наибольшим энергетическим потенциалом, в связи с чем возникает необходимость прогнозирования теплофизических свойств воздуха над водоемами в приземном пограничном слое [1, 2].

Ветропарк в г. Ульяновске расположен на левом берегу реки Волга, Куйбышевского водохранилища. В розе ветров Ульяновска преобладают западные (35 %) и южные (25 %) ветра, дующие со среднегодовой скоростью 3,9 м/с. Площадь водохранилища в зоне воздействия на ветропарк составляет 181 км<sup>2</sup>. Учитывая розу ветров и площадь, водоем имеет непосредственное влияние на режим работы ветропарка.

Важной задачей в практическом отношении является изучение процессов трансформации воздушного потока, а именно: скорости, температуры и влажности над водоемами. Трансформация скорости ветра обуславливается следующими факторами: 1) изменением величины турбулентного трения и 2) влиянием местного горизонтального барического градиента между сушей и водоемом. Турбулентное трение в воздухе над сушей и водоемом различается как вследствие изменений в гидродинамических свойствах подстилающих поверхностей, изменений турбулентного теплообмена между водной поверхностью и атмосферой, так и различий в термической стратификации приземного слоя воздуха над сушей и водоемом. Что касается барического градиента, то он различается вследствие трансформации температуры над сушей и водоемом, вследствие чего возникает дополнительный градиент давления, который приводит к изменению скорости ветра, причем знак этих изменений зависит от знака горизонтального градиента температуры [1, 3].

Теплообмен между водной поверхностью и атмосферой в сильной степени зависит от характеристик тонкого поверхностного слоя воды и главным образом от величины температуры этого слоя и прилегающего к нему слоя воздуха. Главные формы теплообмена водной поверхности, с атмосферой следующие: турбулентный, лучистый и теплообмен связанный с фазовыми изменениями жидкости (испарение). Определяющими фактором для турбулентного теплообмена является разность температур поверхности воды и прилегающего воздуха, при отсутствии разности этот вид теплообмена не имеет места. Теплообмен, связанный с испарением определяется разностью между максимальной влажностью, соответствующей температуре поверхности воды, и влажностью воздуха [3].

Изучение теплофизических и динамических свойств воздуха в приземном пограничном слое на

суше – задача более емкая и сложная, требующая построения 3D модели поверхности, учитывающая рельеф. Для исследования процессов в приземном слое атмосферы использовалась модель Прандтля для пограничного слоя. Рассмотрены стационарные процессы с известными начальными параметрами давления, скорости и температуры воздуха и воды, без учета осадков. В ходе исследований получены данные о скорости ветра над водоемом на высоте 10 и 100 метров (рис. 1) с разбивкой по часам, с начала суток.

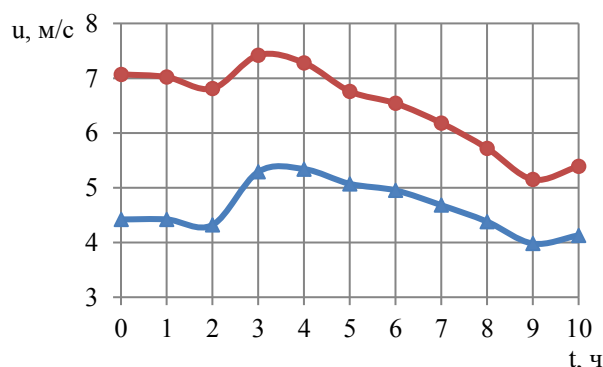


Рис. 1. Скорость ветра в приземном пограничном слое:  
▲ – на высоте 10 метров; ● – на высоте 100 метров

Для полученных скоростей ветра мощность современного ветрогенератора будет составлять: 214 Ватт/м<sup>2</sup> для высоты 10 метров и 398 Ватт/м<sup>2</sup> для высоты 100 метров [1].

Проведенные исследования позволяют прогнозировать параметры ветра с учетом трансформации над водоемами, что позволит закладывать более точные графики электрических нагрузок ветропарков на сутки вперед, оценивать ветровую нагрузку ветрогенераторов и более тщательно подбирать месторасположения ветропарков.

## Список литературы:

1. Porté-Agel, Fernando et al. "Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review." *Boundary-Layer Meteorology* 174 (2019): 1-59.
2. Kirk-Davidson DB, Keith DW. On the climate impact of surface roughness anomalies. *Journal of the Atmospheric Sciences* 65 (2008): 2215-2234.
3. Воронцов, П.А. Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы / П.А. Воронцов.– Ленинград: Гидрометеоздат, 1966.– 296 С.

Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 22-19-00030,  
<https://rscf.ru/project/22-19-00030>.

УДК 532.525.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОСТРУЙ ВОДОРОДА В ПРОЦЕССЕ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ

Козлов В.В.<sup>1,2</sup>, Литвиненко М.В.<sup>1,2</sup>, Литвиненко Ю.А.<sup>2</sup>, Тамбовцев А.С.<sup>2</sup>, Шмаков А.Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет,

г. Новосибирск, Россия 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,

г. Новосибирск, Россия 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

<sup>3</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН,

г. Новосибирск, Россия 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 3

Как известно диффузионное горение микроструи горение микроструй водорода, истекающих из сопел диаметрами 250-500 мкм в зависимости от скорости истечения  $U_0$  протекает по следующим сценариям: 1) Ламинарный факел большой дальности  $U_0 < 150$  м/с ( $Re < 760$ ); 2) Начиная со скорости  $U_0 \sim 150$  м/с ( $Re = 760$ ) возникает «перетяжка» пламени; 3) При скорости  $U_0 \sim 200$  м/с ( $Re = 1013$ ) турбулентный участок пламени отодвигается от ламинарного между ними возникает невоспламененная зона; 4) При скорости  $U_0 \sim 331$  м/с ( $Re = 1677$ ) горение в области выше перетяжки пламени не поддерживается, однако все еще поддерживается горение ламинарного участка. Аналогичные сценарии горения были обнаружены и при диффузионном горении плоской микроструи водорода [1, 2].

В данной работе были экспериментально исследованы особенности диффузионного горения микроструй водорода при их взаимодействии. Экспериментальное исследование особенностей горения микроструй водорода при их взаимодействии производилось теньевым методом при помощи прибора ИАБ-451. Экспериментальная установка, представлена на рис. 1.

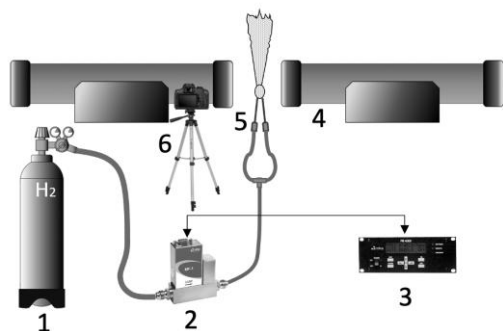


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – баллон со сжатым водородом, 2 – клапан расходомера, 3 – контроллер расходомера, 4 – теньевой прибор ИАБ-451, 5 – 2 микросопла расположенные под углом, 6 – фотоаппарат.

Микросопла, представляющие собой тонкостенные цилиндрические трубочки с внутренним диаметром  $d = 400$  мкм, пересекаются под углом 12 градусов, расстояние между соплами регулируется.

На рис. 2 представлены результаты взаимодействия двух горящих низкоскоростных микроструй водорода. Результирующее пламя остается ламинарным и симметричным относительно оси  $z$  при сближении сопел на расстояние  $\sim 0,5d$ .

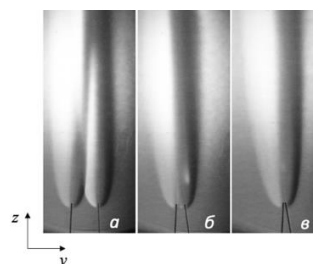


Рис. 2. Теньевая картина взаимодействия ламинарных факелов.

На рис. 3 представлены результаты взаимодействия микроструй водорода. Изначально пламена имеют двузонную структуру (ламинарную сферической формы вблизи среза сопла и турбулентную далее по потоку), что соответствует скорости истечения  $U_0 \sim 150$  м/с. Горящая микроструя не восприимчива к внесению изменений в турбулентную зону пламени.

При постоянной скорости истечения микроструи сближаются и, когда расстояние между соплами становится  $\sim 2d$  ламинарная зона пламени уменьшается по протяженности в направлении оси  $z$ . При сближении микросопел на расстояние  $\sim 0,5d$  и ближе (см. рис. 2 в-г) пространственный размер ламинарной области пламени значительно уменьшается, а турбулентная расширяется в направлении оси  $y$ , но не расширяется в направлении оси  $x$ .

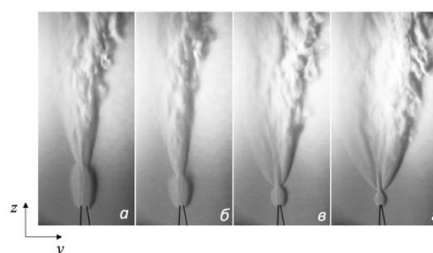


Рис. 3. Теньевая картина взаимодействия факелов с двузонной структурой.

### Список литературы:

1. Шмаков А.Г., Грек Г.Р., Козлов В.В., Коробейничев О.П., Литвиненко Ю. А. Различные режимы диффузионного горения круглой струи водорода в воздухе // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, No 2. С. 27–41.
2. Литвиненко Ю. А., Грек Г. Р., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Шмаков А. Г. Структура присоединенного диффузионного пламени микроструи водорода, истекающей из щелевого сопла // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, No 2. С. 52–66.

Работа поддержана грантом  
Российского научного фонда № 22-19-00151,  
<https://rscf.ru/project/22-19-00151/>.

УДК 621.039.634

## РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР ЭНЕРГОНАПРЯЖЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ПАНЕЛИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ МОДУЛЯ №7 ТИПА А БЛАНКЕТА ИТЭР

Козлов С.А.<sup>1</sup>, Томилов С.Н., Поддубный И.И., Лешуков А.Ю., Свириденко М.Н., Данилов И.В., Путрик А.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НИКИЭТ» 170140, Россия, Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8

<sup>2</sup> Частное учреждение «ИТЭР-Центр» 123182, Россия, Москва, площадь ак. Курчатова 1, стр. 3

В рамках реализации Соглашения о Поставке теплонапряженных панелей первой стенки бланкета ИТЭР, специалистами АО «НИКИЭТ» выполнено комплексное расчетное обоснование конструкции панели первой стенки (ППС). ППС является теплонапряженным компонентом системы бланкета, обращенным к плазме и механически зафиксирована на защитном блоке с помощью системы крепления. Обращенная к плазме часть ППС (далее пальцы) подвергается воздействию теплового потока до  $4,7 \text{ МВт/м}^2$ .

Пальцы представляют собой трехслойную конструкцию, включающую: несущий стальной корпус, бронзовый теплопроводящий слой и бериллиевое защитное покрытие.

Объектом исследования является ППС №7 тип А, расположенная на верхнем своде вакуумной камеры, рис. 1.

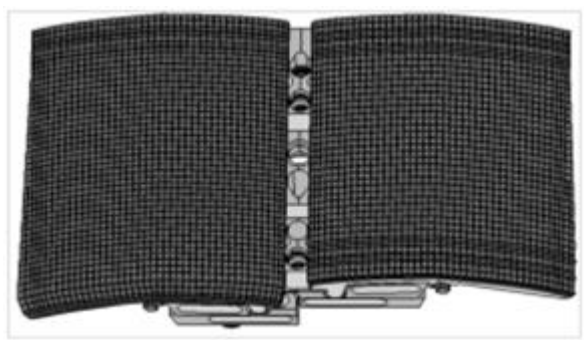


Рис. 1. ППС №7 тип А вид со стороны плазмы.

Расход теплоносителя в тракте пары пальцев принят  $0,45625 \text{ кг/с}$ , а температура теплоносителя на входе  $70^\circ\text{C}$  при давлении  $4 \text{ МПа}$ .

Рассмотрено 4 варианта распределения теплового потока по поверхности бериллиевого покрытия пальцев:

- 1) равномерный тепловой поток  $0,7 \text{ МВт/м}^2$  на всей поверхности пальцев, обращенной к плазме;
- 2) пиковый тепловой поток  $4,7 \text{ МВт/м}^2$  на всей поверхности пальцев, обращенной к плазме;
- 3) равномерный тепловой поток  $0,7 \text{ МВт/м}^2$  на центральных пальцах и пиковый тепловой поток  $4,7 \text{ МВт/м}^2$  на периферийных пальцах;
- 4) равномерный тепловой поток  $0,7 \text{ МВт/м}^2$  на периферийных пальцах и пиковый тепловой поток  $4,7 \text{ МВт/м}^2$  на центральных пальцах.

Значения коэффициентов теплоотдачи для различных участков тракта охлаждения рассчитаны с использованием критериальной зависимости Sieder-Tate.

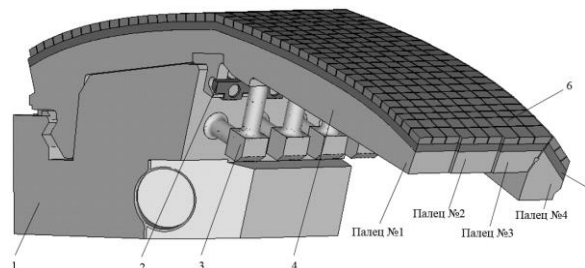


Рис. 2. Расчетная модель. 1 – фрагмент НКПС, 2 – система крепления пальцев, 3 – патрубки подвода/отвода теплоносителя, 4 – корпус пальца, 5 – теплопроводящий слой, 6 – бериллиевое покрытие.

Тепловой расчет проводился с использованием многофункционального расчетного кода ANSYS APDL. Расчетная модель представлена на рисунке 2. Корпуса элементов ППС моделировались с использованием элемента solid70, ядро потока теплоносителя с помощью fluid116, а связь между стенкой тракта охлаждения и ядром - SURF152. Тепловой интерфейс между различными элементами конструкции был осуществлен при помощи контактных пар, состоящих из элементов target170 и conta174, в которых задавалась контактная термическая проводимость  $10^3 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$ .

Представлены результаты расчета полей температур в нестационарной постановке для регулярной и нерегулярной пар пальцев, расположенных в периферийной части панели.

Подогревы теплоносителя в вариантах №1–4 составили:  $33^\circ\text{C}$ ,  $71^\circ\text{C}$ ,  $51^\circ\text{C}$  и  $52^\circ\text{C}$  соответственно. Температуры стальных элементов конструкции не превышают допустимую температуру  $450^\circ\text{C}$  во всех рассмотренных вариантах. Температура бронзового слоя превышает допустимую  $350^\circ\text{C}$  в варианте №4 и составляет  $413^\circ\text{C}$ . В варианте расчета №2 в тракте охлаждения возможно достижение кризиса теплообмена 1-го рода в виду превышения плотности критического потока максимум которого составил  $17,45 \text{ МВт/м}^2$  в то время как критический тепловой поток рассчитанный по формуле Tong-75 составляет  $17,09 \text{ МВт/м}^2$ . Максимумы температур в бериллиевом защитном покрытии для вариантов №2–4 достигаются в зонах приложения пиковой тепловой нагрузки и составляют  $922^\circ\text{C}$ ,  $926^\circ\text{C}$  и  $909^\circ\text{C}$  соответственно, однако перегрев носит локальный характер и превышение допустимой температуры равной  $660^\circ\text{C}$ , наблюдается менее чем на 5% поверхности бериллиевого покрытия пальцев.



УДК 536.413, 536.42

## ТЕРМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ГАЛЛИЕВЫХ ГРАНАТОВ ГГГ, ГСГГ И КНГГ

Козловский Ю.М., Станкус С.В.

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

Монокристаллы со структурой граната занимают ведущие места в лазерной технике в качестве активных сред лазеров ближнего ИК диапазона. Для проведения тепловых и прочностных расчетов такой техники необходимы достоверные данные по свойствам кристаллов. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование теплового расширения монокристаллов галлиевых гранатов ГГГ ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ), ГСГГ ( $Gd_{3,04}Sc_{1,8}Ga_{3,16}O_{12}$ ) и КНГГ ( $Ca_3Nb_{1,5}Ga_{3,5}O_{12}$ ).

Измерения термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) выполнены dilatометрическим методом на установке DIL-402С по методике [1]. Использовались корундовый держатель и толкатель, термopара тип S и защитная атмосфера высокочистого гелия. Измерения проведены в интервале температур 293,15–1473 К при нагреве–охлаждении печи со скоростью 2 К/мин. Оцениваемая погрешность определения ТКЛР не превышает 3%.

На рис. 1 приведены первичные данные экспериментов, сглаженные методом Савицкого-Голея.

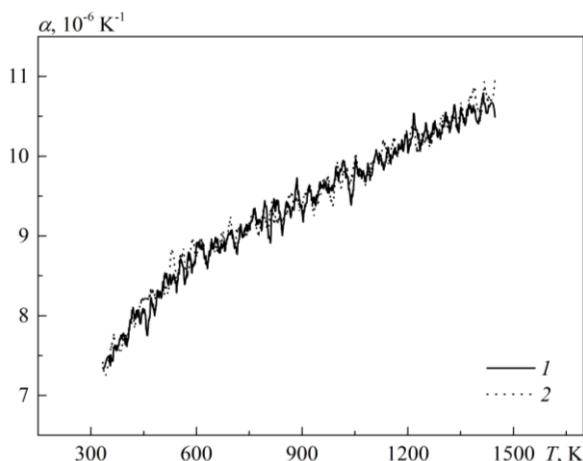


Рис. 1. ТКЛР образца ГСГГ.  
1 – 2-ой нагрев; 2 – 3-ий нагрев.

Как видно из графика, результаты хорошо воспроизводились. Рассчитанные сглаженные значения ТКЛР и относительного удлинения, а также термического коэффициента объемного расширения и плотности сведены в таблицы.

На рис. 2 представлено сопоставление ТКЛР исследованных гранатов. Видно, что данные для ГГГ и ГСГГ практически совпадают и лежат существенно ниже ТКЛР для кальций-ниобий-галлиевого граната. Кристаллическая структура гранатов обычно описывается формулой  $\{C_3\} [A_2] (D_3) O_{12}$ , где катионы в подрешетке кислорода имеют различное окружение.  $\{C\}$  – соответствует 24 додекаэдрическим "c" положениям,  $[A]$  – 16

октаэдрическим "a" положениям и  $(D)$  – 24 тетраэдрическим "d" положениям.

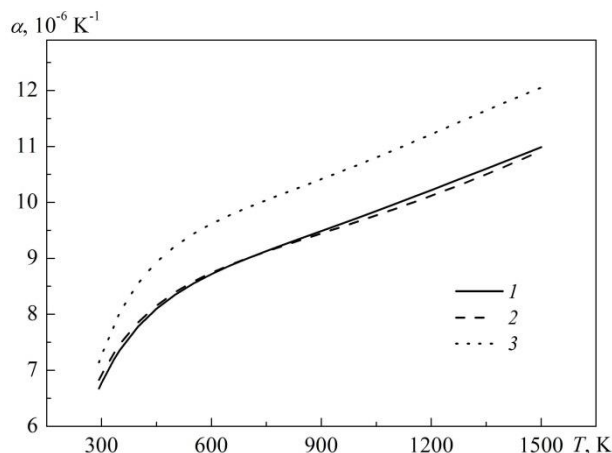


Рис. 2. ТКЛР галлиевых гранатов.  
1 – ГГГ; 2 – ГСГГ; 3 – КНГГ.

Ранее [2] была высказана гипотеза об определяющем влиянии тетраэдрических позиций в структуре граната на величину ТКЛР. Это предположение подтверждается результатами наших измерений. Известно, что в галлиевых гранатах  $d$ -позиции целиком заняты ионами  $Ga^{3+}$ , поэтому замещение катионов в октаэдрах и додекаэдрах практически не сказывается на заселенности тетраэдров и, следовательно, величине  $\alpha(T)$ . В КНГГ часть "d"-позиций занимают ниобий и катионные вакансии [3], что и приводит к увеличению ТКЛР. Для ГСГГ ионный радиус скандия превышает предельный ионный радиус катиона для тетраэдрического окружения [4] и, следовательно, скандий не может располагаться в "d"-позициях.

### Список литературы:

1. Козловский Ю.М., Станкус С.В. Плотность и тепловое расширение самария в широком интервале температур // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 4. С. 625–631.
2. Глушкова В.Б., Жариков Е.В., Зиновьев С.Ю. и др. Тепловое расширение редкоземельных галлиевых гранатов // Москва, 1986. 25 с. (Препринт / АН СССР. Ин-т общей физики; № 289).
3. Воронько Ю.К., Кудрявцев А.Б., Еськов Н.А. и др. Комбинационное рассеяние света в кристаллах и расплаве кальций-ниобий-галлиевого граната // ДАН СССР. 1988. Т. 298, № 3. С. 604–607.
4. Боккий Г.Б. // Кристаллохимия. – М.: МГУ, 1960. 357 с.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 121031800219-2).

УДК 536.24

## ЭФФЕКТ ГАРМОНИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ ПОТОКА В ТЕПЛОВОЙ ЗАВЕСЕ НАД ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНОЙ

Козюлин Н.Н., Хребтов М.Ю.

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

Тепловые завесы находят широкое применение в инженерных приложениях для теплонагруженных элементов, таких как лопатки турбин, стенки камер сгорания и др. [1]. В конструировании устройств с тепловыми завесами, как правило, не учитываются эффекты когерентных структур и нестационарные квази-периодические процессы в слоях смешения. Генерация когерентных структур может приводить как к усилению турбулентной диффузии, так и к ее ослаблению за счет передаче части энергии стохастической компоненты потока когерентной компоненте.

В данной работе методом численного моделирования исследуется воздействие на пристенный пограничный слой, образованный потоком хладагента тепловой завесы, с помощью гармонического возмущения на выделенной частоте с целью уменьшения вертикальной диффузии охладителя от стенки.

Сопло подачи охладителя имеет прямоугольное сечение (рис.1). Охладитель подается горизонтально, затем попадает на наклонную поверхность, расположенную под углом в 30 градусов, и вытекает на охлаждаемую плоскую пластину. Между выходным соплом охладителя и пластиной находится зазор с резким уступом, по высоте равный высоте струи охладителя. Наличие уступа приводит к формированию в потоке когерентных структур, аналогично с дорожкой Кармана на частоте  $Sh = 2fD/(U_f + U_c) \approx 0.2$ . Где  $U_f$  – скорость основного потока,  $U_c$  – скорость охладителя,  $f$  – размерная частота,  $D$  – высота уступа.

В данной работе поток охладителя модулировался на частотах кратных собственной частоте вихрей ( $Sh=0.2, 0.4$ ) с амплитудами в диапазоне 30–50% от скорости основного потока. Соотношение входной скорости струи охладителя и скорости основного потока было выбрано равным 2.

Расчет проводился в открытом пакете OpenFoam [2] с дискретизацией по методу конечных объемов со вторым порядком аппроксимации по времени и пространству. Использовались уравнения метода крупных вихрей (LES) с подсеточной моделью WALE [3]. Температура учитывалась как пассивная примесь. Использовалась безразмерная постановка уравнений с числом Рейнольдса 5000 (рассчитанным по толщине струи охладителя и его скорости). Расчетная сетка состояла из 5 млн. гексагональных ячеек, длина расчетной области составляла  $40 D$ , высота  $15 D$ , и ширина  $4D$ . В поперечном направлении использовались периодические граничные условия.

В результате расчетов было обнаружено, что даже без внешнего возмущения поток подвергался сильному влиянию сходящих с кромки уступа когерентных вихревых структур, действие которых приводило к отклонению струи в продольном направлении и прижатию ее к охлаждаемой поверхности. Наибольший

положительный эффект оказывали вихри с вращением против часовой стрелки, которые генерировались над поверхностью струи. При прохождении вблизи выхода струи на горизонтальную часть поверхности они ускоряли находящийся под ними поток (содержащий охладитель), что препятствовало отрыву течения и образованию зоны рециркуляции.

При добавлении модуляций в поток наиболее сильный эффект дало использование второй гармоники основной гидродинамической моды ( $Sh=0.4$ ). В этом случае стабильность схода когерентных структур повышалась, а струя имела более сильное прижатие к стенке, и меньшую вертикальную диффузию охладителя на удалении от сопла (рис. 1).

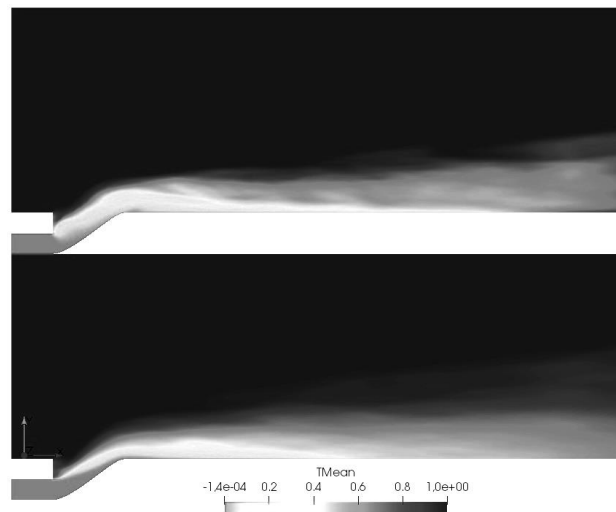


Рис. 1. Распределение средней температуры в продольном сечении потока для случая с возмущением на частоте  $Sh=0.4$  и амплитудой 30%  $U_f$  (сверху) и для случая без возмущения (снизу).

Таким образом, был исследован перспективный для инженерных приложений способ динамического управления пристенным потоком тепловой завесы с помощью гармонического возмущения струи на выделенной частоте.

### Список литературы:

1. Zhang J. et al. Recent advances in film cooling enhancement: a review //Chinese Journal of Aeronautics. – 2020. – Т. 33. – №. 4. – С. 1119-1136.
2. Jasak H. et al. OpenFOAM: A C++ library for complex physics simulations //International workshop on coupled methods in numerical dynamics. – IUC Dubrovnik Croatia, 2007. – Т. 1000. – С. 1-20.
3. Ducros F., Nicoud F., Poinso T. Wall-adapting local eddy-viscosity models for simulations in complex geometries //Numerical Methods for Fluid Dynamics VI. – 1998. – С. 293-299.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 536.242, 53.07

## ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ НАНОЖИДКОСТИ НА ПОДЛОЖКЕ

Кокорин А.В., Назаров А.Д., Серов А.Ф.

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

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования динамики испарения капле суспензии с базовой жидкостью дистиллированная вода: 1) массовой концентрацией наночастиц диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ): 0,05wt.%, 0,1wt.%, 0,2wt.%; 2) наночастиц оксида железа (II, III) 0,05wt.%, 0,1wt.%, 0,2wt.%. А также водно-спиртового раствора концентрации спирта: 20 wt.%, 30 wt.%, 40 wt.%, 92 wt.%.

Изменение высоты капли, угла смачивания и диаметра контактной площадки во времени проведены с помощью разработанного оборудования, в основе которого лежит комплексный подход совместного использования емкостного (электрический) и оптического методов регистрации [1].

Структурная схема ёмкостного измерителя высоты капли состоит из первичного, вторичного измерительных преобразователей, компьютера с программным обеспечением и координатного стола.

В оптическом методе используются камера (2 Мп), источник света, масштабная линейка для определения веса пикселя матрицы.

Программа для обработки фотографии (определение контура измеряемого объекта) использует алгоритм технического зрения, написанный на языке Python с использованием библиотеки OpenCV.

Разработанным оборудованием получены данные динамики изменения диаметра контактной площадки, высоты капле и угла смачивания во времени при испарении капле наножидкостей и проведено сравнение этих параметров с каплей базовой жидкости на металлической подложке с шероховатостью поверхности  $Ra1,0$ .

Температура и влажность окружающей среды во время измерений составляли в диапазоне 27,3–27,6°C и 23,2–23,9% соответственно. Температура подложки равнялась температуре окружающей среды. Наблюдение осуществлялось до полного испарения капле. Капли объёмом 2,5 мкл на подложку генерировались микропипеткой.

На рисунке (см. рис. 1) демонстрируется изменение параметров:  $d$  [мм] – диаметр контактной площадки,  $h/h_0$  – относительное изменения высоты капле ( $h_0$  – начальная высота капле [мм]),  $\alpha$  [град.] – угол смачивания при испарении капле суспензии концентрации  $\text{SiO}_2$  wt.0.05%.

Видно уменьшение все трех параметров во времени. Наблюдается скачкообразное уменьшение диаметра контактной площадки [2]. Монотонность кривой диаметра контактной площадки для капле воды также нарушена, но изломанность линии значительно меньше. Можно увидеть разный характер кривых. Если кривую изменения диаметра контактной площадки капле наножидкости, с некоторыми допущениями, можно аппроксимировать прямой, то кривая для воды существенно имеет нелинейный вид. Можно ожидать скачкообразного изменения краевого угла

смачивания для наножидкости, однако, этого не наблюдается.

При уменьшении высоты капле, примерно на 50% от начального значения  $h_0$ , наблюдается снижение скорости изменения параметра  $h/h_0$ .

Концентрация наночастиц  $\text{SiO}_2$  wt.0.05% увеличивает время испарения на 30% в сравнении с временем испарения капле базовой жидкости.

Дальнейшее увеличение концентрации приводит к не существенному увеличению времени испарения капле наножидкости по сравнению с базовой жидкостью.

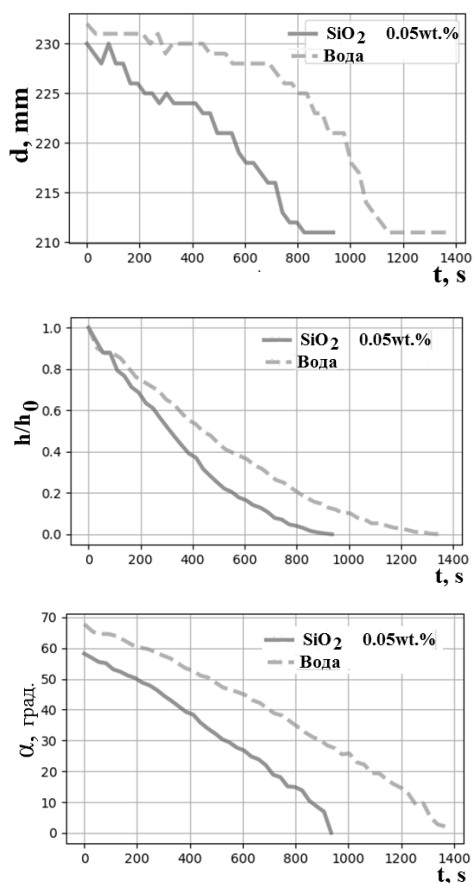


Рис. 1. Динамика изменения диаметра контактной площадки, угла смачивания, высоты капле воды с наночастицами диоксида кремния концентрации 0.05% во времени.

### Список литературы:

1. Кокорин А.В., Назаров А.Д., Серов А.Ф. Измерительный комплекс для исследования испарения капле жидкости на подложке // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 8. С. 126-133. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-8-126-133.
5. Семенов А.А., Феоктистов Д.В., Зайцев Д.В., Кузнецов Г.В., Кабов О.А. Экспериментальное исследование испарения капле жидкости на нагреваемой твердой поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 6. С. 801 – 804.

УДК 532.546+ 536.2+ 539.21

## ПЕРКОЛЯЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭФФЕКТИВНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Колесников Б.П., Арушанян Р.Р.

ФГБОУ ВО Кубанский государственный технологический университет  
350072, Краснодар, Московская, 2

При исследовании тепломассообменных и гидродинамических процессов в пористых средах, заполненных флюидами, используют различные относительные эффективные кинетические коэффициенты переноса, характеризующие зависимость этих процессов от структурно-топологических характеристик пористой среды, поверхностных свойств порового пространства (угла смачивания), флюидонасыщенности и реологических свойств флюидов. Так при прогнозировании эффективной теплопроводности таким коэффициентом является относительная проводимость перколяционного кластера (ОППК)  $\Lambda$  [1], при исследовании молекулярного переноса пара в порах – коэффициент диффузного сопротивления (КДС)  $\mu$  [2], при расчете динамики добычи нефти и газа – относительная фазовая проницаемость (ОФП)  $K$  [3]. Здесь  $\Lambda = \lambda_0/\lambda$  – отношение, соответственно, эффективной проводимости ПК и проводимости компонента ПК, которое соответствует адиабатным условиям на поверхностях раздела ПК с окружающей средой;  $\mu = D/D_p$ , где  $D$  и  $D_p$  – коэффициенты диффузии пара, соответственно, в воздух для неограниченного пространства и через поровое пространство;  $K = K_f/K_p$  – это отношение фазовой проницаемости пористой среды к абсолютной (однофазовой) проницаемости.

Рассматривается однородная трех компонентная пористая среда, состоящая из твердого каркаса и порового пространства, образованного капиллярами, заполненными двумя разными флюидами. Структуру среды представляли в виде двух уровневой иерархической модели, состоящей из двухкомпонентной системы «каркас - поровое пространство» и заполняющей поровое пространство двухкомпонентной системы «флюид – флюид», каждая из которых моделировалась совокупностью взаимопроникающих ПК данной системы, так как величины  $\Lambda$ ,  $\mu$ ,  $K$  характеризуют протекание соответствующих процессов непосредственно в ПК.

Анализ указанных относительных коэффициентов показал, что все они зависят от одних и тех же структурно-топологических характеристик пористой среды, а подобие процессов переноса предполагает одинаковость такой зависимости по форме и содержанию, которую на основании физики и статистики пористого тела можно записать в виде

$$\mu^{-1} \sim K \sim \Lambda = \Theta \sqrt{C} = \Theta \sqrt{9Z}, \quad (1)$$

где  $\Theta$  – мощность активной части ПК, участвующей в процессе переноса;  $9$  – объемное содержание компонента,  $C$  – критическая смежность, представляющая

собой безразмерное критическое сечение ПК, в котором концентрируются направленные процессы [1] (значению  $C$  соответствует критический радиус капилляра  $r$ , следовательно, для ОППК  $C \sim r^2$ , для ОФП при течении ньютоновских жидкостей  $C \sim r^4$ );  $Z = 9^n$  – коэффициент фазовой консолидации  $0 \leq Z \leq 1$ ;  $n$  – обобщенный показатель, учитывающий факторы, влияющие на процессы фазовой консолидации.

С другой стороны, для описания ОППК можно использовать степенные зависимости, полученные с помощью теории протекания и фрактальной геометрии [1]:  $\Lambda = 9^k$  – для однородной и  $\Lambda = (9 - 9_c)^t$  – фрактальной областей ПК ( $k$ ,  $t$  – переменные индексы эффективной проводимости,  $9_c$  – порог протекания).

Использование этих зависимостей в сочетании с (1) в рамках предложенной модели позволило учесть влияние реальных особенностей структуры и поверхностных свойств порового пространства, включая явление гистерезиса ОППК и ОФП, возникающего при смене направления фильтрационных потоков в водонефтяных системах [3], а также учесть реологические свойства флюидов путем применения соответствующих значений показателя  $n$ .

В результате исследования получены многопараметрические зависимости ОППК, КДС, ОФП для гидрофильных и гидрофобных систем в широкой области изменения пористости, флюидонасыщенности, угла смачивания. Верификацию рассматриваемой модели проводили посредством подбора её параметров при сравнении полученных расчетных значений ОППК, КДС, ОФП с известными экспериментальными и расчетными зависимостями.

Представленная модель проявляет универсальный характер, так как, согласно (1), позволяет комплексно анализировать и прогнозировать рассмотренные относительные эффективные кинетические коэффициенты переноса путем подбора оптимальных значений параметров, используемых в расчетах, при сравнении с известными экспериментальными данными, хотя бы для одного из них.

### Список литературы:

1. Kolesnikov B.P. The unified approach to a definition of effective conductivity index of percolating cluster in macroscopically disordered environments // Journal of Physics: Conference Series. 2020. С. 012031.
2. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков. Л.: Энергоатомиздат. 1991. 246 с.
3. Kolesnikov B.P., Arushanyan R.R. The percolation model of relative conductivities and phase permeabilities // Journal of Physics: Conference Series. 2022. С. 012005.

УДК 536.24

## ОДНОФАЗНЫЙ КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОБМЕН В КАНАЛАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ЗАПОЛНЕННЫХ АНИЗОТРОПНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДОЙ

Коновалов Д.А., Кожухов Н.Н., Ряжских В.И.

Воронежский государственный технический университет,  
394020, Россия, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Создание компактных энергетических установок, работающих в условиях высоких удельных тепловых потоков является актуальной задачей, которая может быть успешно решена за счет интенсификации теплообмена применением пористых и микроканальных теплообменных элементов. Особое внимание уделяется пористым средам с высокой пористостью, которые характеризуются компактностью, высоким значением коэффициента теплоотдачи и гидравлическим сопротивлением, сопоставимым со значением для гладкого канала. Отдельное место занимает исследование так называемых градиентных пористых сред, когда теплообменный элемент представляет собой послойную конструкцию состоящий из нескольких горизонтальных слоев или вставок с различной пористостью, расположенных по ходу течения теплоносителя. Исследования отечественных и зарубежных авторов показывают, что использование такого способа интенсификации является оправданным [1–3]. Однако по мере течения теплоносителя через канал тепловые поля меняются в продольном и поперечном направлениях. Актуальной является оценка эффективной интенсификации теплообмена в теплообменнике заполненном пористой средой при наличии геометрической анизотропии как по высоте канала, так и по его длине. Экспериментальная модель гибридного теплообменника может быть сравнительно просто реализованы за счет использования готовых образцов металлических пен или с применением современных технологий 3D печати на промышленных металлических принтерах.

Физическая область решения представлена как плоский прямоугольный канал, заполненный анизотропной пористой средой (рис. 1).

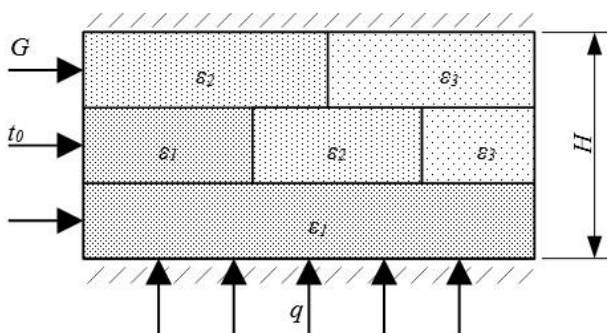


Рис. 1. Физическая область решения для теплообменника с градиентной пористостью ( $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$ ). Соотношения длин, высот и пористостей канала являются условными.

Теплоноситель с массовым расходом  $G$  движется с начальной температурой  $t_0$  по каналу вдоль нагретой стенки, на которой заданы граничные условия второго рода. Остальные стенки канала являются теплоизолированными. Внутри канал заполнен анизотропной пористой средой, а пористость изменяется как по длине канала, так и по его высоте. Фазовые переходы

отсутствуют, коэффициент смачиваемости поверхностей одинаков и остается постоянным.

Расчеты производились в среде Comsol с использованием двухтемпературной модели. Диапазон пористости отдельных элементов изменялся от 0,6 до 0,95.

Результаты показали, что непосредственно с поверхностью нагрева наиболее предпочтительным является использование сплошного слоя из мелкопористого материала как по длине канала, так и по его высоте. Однако, по мере течения теплоносителя, пористый каркас практически перестает работать, увеличивая при этом гидродинамические потери. Интегральные характеристики, полученные в ходе моделирования представлены на рис. 2. Для верификации проводилось сравнение с результатами работ для послойного (по высоте канала) изменения пористости [4].

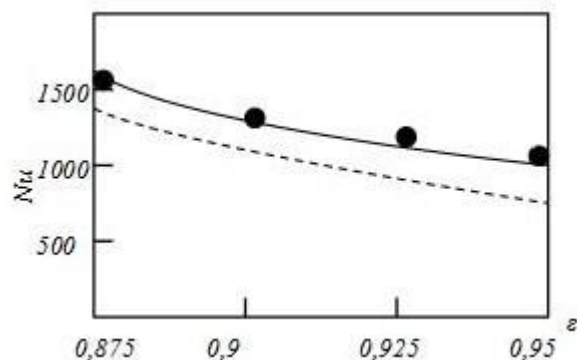


Рис. 2. Зависимость числа Нуссельта от пористости:  
— - пористость возрастает по высоте канала;  
--- пористость постоянна по высоте канала;  
● - результаты работы [4] для канала с переменной пористостью.

В результате получены значения полей температур и давлений в широком диапазоне изменения пористости канала как по его высоте, так и длине.

### Список литературы:

1. Kozhukhov N.N., Kozhukhova E.A., Kononov D.A., Prutskikh D.A., Perunova V.I. Modeling of heat transfer in an element with anisotropic porosity // (2021) Journal of Physics: Conference Series, 2039, статья № 012011.
2. Nikolenko A.V., Ryazhskikh V.I., Kononov D.A. On the structure of the orthotropic 3d permeability tensor of an anisotropic porous body in heat and mass transfer problems // Journal of Physics: «VI International Conference on Information Technology and Nanotechnology, ITNT 2020», 2021 012082 IOP Publishing DOI: 10.1088/1742-6596/1745/1/012082.
3. Trilok G, K. Kiran Kumar, N. Gnanasekaran, Moghtada Mobedi Numerical assessment of thermal characteristics of metal foams of orderly varied pore density and porosity under different convection regimes // International Journal of Thermal Sciences 172 (2022) 107288.
4. Marcello Iasiello, Nicola Bianco, Wilson K.S. Chiu, Vincenzo Naso The effects of variable porosity and cell size on the thermal performance of functionally-graded foams // International Journal of Thermal Sciences Volume 160, February 2021, 106696.

УДК 620.9, 502.171

**ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ В РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ****Копьев Е.П., Садкин И.С., Шадрин Е.Ю., Мухина М.А.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Одним из перспективных направлений повышения эффективности сжигания различных типов топлив является их модифицирование путем добавления металлического горючего. В качестве металлического горючего используют частицы металлов, обладающие определенными физико-химическими свойствами, благоприятствующими сгоранию [1], в основном это дисперсные порошки алюминия, различной формы и размеров [2]. Перспективными считаются смеси алюминия различной дисперсности, смеси с ним наноразмерных порошков других металлов или их сплавов. Кроме того, алюминий может окисляться не только свободным кислородом, но и связанным, входящим в состав воды или углекислого газа. Таким образом, добавление алюминия в топливо позволяет получать горючие смеси с уникальными свойствами. Например, добавление незначительного количества (до 15%) порошка алюминия к ракетному топливу может существенно повысить температуру продуктов сгорания (до ~3000 К) [3]. В настоящее время годовой выпуск алюминиевых порошков составил около 200 тысяч тонн в год [4], а разработанные способы их получения позволяют производить порошки различной формы и дисперсности - от десятка микрометров до нанометров [5], что позволяет использовать их в различных приложениях.

Одним из перспективных направлений для использования нанопорошков алюминия является их добавка к жидкому топливу при сжигании в среде с перегретым водяным паром, поскольку при окислении оксида алюминия в воде выделяется большее количество тепла, чем в воздухе. Для анализа влияния добавки нанопорошка алюминия на процесс горения жидкого углеводородного топлива, распыляемого перегретым водяным паром [6, 7], было проведено экспериментальное исследование горения смеси дизельного топлива и наночастиц (содержание порошка ~1% по массе топлива). В качестве нанопорошка был использован порошок, состоящий из частиц оксида алюминия: ~ 90% масс.  $Al_2O_3$  и до 10% не окисленного Al, частицы имеют сферическую форму, средний размер 36-46 нм.

Сжигание осуществлялось в атмосферном распылительном горелочном устройстве, в котором топливо распыляется струей перегретого водяного пара [8].

При сжигании такой смеси пламя имеет преимущественно синий цвет с оранжевыми областями. В ходе эксперимента было получено распределение средней

по времени температуры вдоль вертикальной оси сопла горелочного устройства. Для измерения температуры использовалась платинородий-платинородиевая термопара типа В, закрепленная на координатно-перемещающем устройстве. Тепловыделение при сжигании смеси дизельного топлива с наночастицами определялось по измерениям на проточном калориметре. Концентрации токсичных веществ в продуктах сгорания определялись с помощью газоанализатора Testo 350. Забор охлажденной газовой пробы осуществляется на выходе из калориметра.

Тепловыделение при сжигании дизеля в смеси с наночастицами составило 45.4 МДж/кг, что близко к высшей теплоте сгорания дизельного топлива в пределах погрешности  $\pm 1.5$  МДж/кг (высшая теплота сгорания дизельного топлива 44.94 МДж/кг). Полученная теплота оказывается несколько выше, чем при горении дизеля без добавок, что, по всей видимости, вызвано присутствием в смеси наночастиц алюминия, так как они дают дополнительную теплоту при горении.

Содержание токсичных компонентов в продуктах сгорания в пересчете на килограмм топлива составляет 0,84 г/кг для CO и 0,83 г/кг для NOx. и удовлетворяет 2 классу европейского стандарта EN 267.

## Список литературы:

1. Брейтер А.Л., Мальцев В.М., Попов Е.И. Пути модификации металлического горючего конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1990. № 1(26). С. 97–104.
2. Ritter H., Braun S. High Explosives Containing Ultrafine Aluminum ALEX // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2001. № 6(26). С. 311–314. DOI:10.1002/1521-4087.
3. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачёв В.С., Коротков А.И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. - М.: Наука, 1972. 294 с.
4. Тихов С.Ф., Романенков В.Е., Садыков В.А., Гаврилов В.Ю. Пористые композиты на основе оксид-алюминиевых керметов. - Н.: СО РАН: Фил. "Гео," 2004. 198 с.
5. Гопаенко В.Г., Осипов Б.Р., Назаров Б.П. Производство и применение алюминиевых порошков и пудр. - М.: Металлургия, 1980. 458 с.
6. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. NOx reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning // Process Safety and Environmental Protection. 2021. (152). С. 240–248. DOI:10.1016/j.psep.2021.06.016.
7. 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. (303). С. 121183. DOI:10.1016/J.FUEL.2021.121183.
8. Anufriev I.S., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // Fuel Processing Technology. 2019. (192). С. 154–169. DOI:10.1016/j.fuproc.2019.04.027.

УДК 69.036:533.6.07+536.24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА АЭРОДИНАМИКУ ГРУППЫ МОДЕЛЕЙ ЗДАНИЙ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Коробков С.В.<sup>1</sup>, Гныря А.И.<sup>1</sup>, Терехов В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, Россия, Томск, пл. Соляная, 2

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

Высотное здание – это сложный организм, где должны быть взаимосвязаны все проектные и конструктивные решения. В России пока недостаточно такого опыта проектирования и длительной эксплуатации высотных зданий и зданий повышенной этажности, как например, за рубежом.

В связи с этим открывается широкий горизонт новых исследований, посвященных изучению аэродинамических особенностей ветрового воздействия на подобные сооружения с учетом характерных для России природно-климатических условий.

Особое значение в настоящее время имеет сложный характер структуры течения в большой группе зданий в существующей городской застройке. Стоит принять во внимание, что нормативная документация не в состоянии учесть все возможные расположения этих объектов, что во многом затрудняет оптимальное проектирование кварталов или микрорайонов городской застройки.

Воздействие ветровых нагрузок характеризуется коэффициентом давления  $C_p = 2\Delta P / \rho U_0^2$ , где  $U_0$  – скорость ветра, а  $\Delta P$  – относительное давление на поверхности здания. Данный коэффициент во многом зависит от конфигурации здания, его высоты и формы, направления воздушного потока, взаимного расположения зданий и других параметров.

Имеется ряд экспериментальных и численных работ, посвященных изучению аэродинамики как отдельных моделей различных форм и конфигураций, так и их групп [1–4].

Основной целью настоящей работы является изучение ветровых нагрузок на модели зданий в виде квадратных призм, расположенных в группе. Рассматривается группа из двух моделей в виде квадратных призм сечением  $a=50 \times 50$  мм и высотой  $H=150$  мм при их поперечном смещении  $L1$  относительно друг друга (см. рис. 1). Скорость ветрового потока  $U_0$  изменялась от 15 до 25 м/с ( $Re=31300 \div 42500$ ), а угол его атаки принят 0 град.

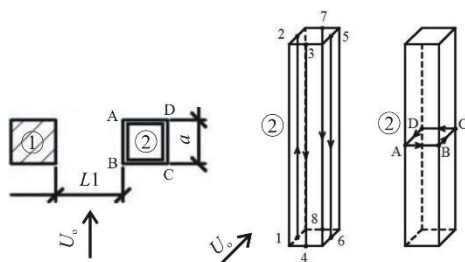


Рис. 1. Схема расположения группы моделей относительно ветрового потока при их поперечном смещении  $L1$  с указанием вертикальных и горизонтальных сечений на модели «2».

Исследуемой является модель «2», модель «1» является препятствием. На рис. 2 приведены интегральные значения коэффициентов давления по граням модели квадратной призмы «2» при скорости ветра 15 и 25 м/с.

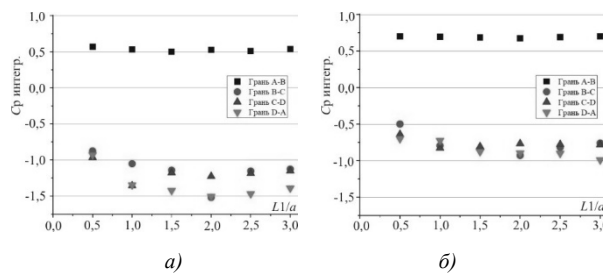


Рис. 2. Интегральные значения коэффициентов давления по граням модели квадратной призмы «2»: а)  $U_0=15$  и б)  $U_0=25$  м/с.

Анализируя средние значения  $C_p$  по всем граням модели можно отметить следующие особенности:

Увеличение скорости ветра и увеличение калибра  $L1/a$  несущественно влияют на коэффициенты давления фронтальной грани  $A-B$ . При этом это распределение по грани  $A-B$  равномерно.

Распределение коэффициентов давления по боковым граням подвержено большему изменению в зависимости от скорости. При любой скорости ветра в диапазоне поперечного смещения  $L1/a=1,5 \dots 2,5$  замечен рост разрежения. Очевидно, что в этом положении модель находится под критическими нагрузками. Боковая грань  $D-A$  находится напротив модели-препятствия «1», вследствие чего на нее действует поджатый воздушный поток. Противоположная боковая грань  $B-C$  подвержена только действию подковообразного вихря. При  $L1/a=0,5$  слияние отрывных подковообразных вихрей приводит к формированию между моделями турбулентного течения с высокой интенсивностью завихрений, что приводит к сильному росту давления.

### Список литературы:

1. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Леденев П.В. Аэродинамические характеристики здания для расчета ветрового воздействия на ограждающие конструкции // Жил. Стр.-во. 2010. № 1. С. 7–10.
2. Саленко С.Д., Обуховский А.Д., Гостеев Ю.А., Телкова Ю.В. Исследование структуры течения в окрестности двух балок квадратного поперечного сечения в условиях интерференции // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т.17. №2. С. 313–323.
3. Yu X.F., Xie Z.N., Zhu J.B., Gu M. Interference effects on wind pressure distribution between two high-rise buildings // Journal of Wind Engin. & Indust. Aerod. 2015. Vol. 142. Pp. 188–197.
4. Gnyria A., Korobkov S., Koshin A., Terekhov V. Aerodynamic and thermal interference of turbulent separated flows over building models // MATEC Web of Conf. (STS-33). 2017. Vol. 115 02002.

Исследования выполнены в рамках госзадания (АААА-А17-117030310010-9).

УДК 536.24

## ДИНАМИКА ПАРОГАЗОВОГО ПУЗЫРЯ ПОД НАГРЕВАЕМОЙ ПОДЛОЖКОЙ

Кочкин Д.Ю.<sup>2</sup>, Мунгалов А.С.<sup>2</sup>, Деревянников И.А.<sup>1,2</sup>, Марчук И.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

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

Переход из жидкой фазы в газовую — один из самых распространенных процессов, как в природе, так и в технике. При кипении и испарении отводится значительное количество тепла, необходимого для фазового перехода. Многие системы охлаждения основаны на этом принципе. В основном процесс кипения изучается при отрыве пузырьков пара от нагретой поверхности под действием выталкивающей силы. Однако также представляет интерес процесс кипения на обращенных вниз поверхностях, где выталкивающая сила прижимает пузырьки к подложке. В данной работе экспериментально исследуется процесс роста парогазового пузыря под прозрачной нагреваемой подложкой.

Рабочий участок (см. рис. 1) представляет собой закрытую прямоугольную прозрачную емкость из оргстекла, заполненную рабочей жидкостью (этанолом). Верхняя стенка рабочего участка образована сапфировой пластиной толщиной 2 мм, на внутреннюю сторону которой нанесен прозрачный ИТО нагреватель, подключенный к источнику питания. Внутри рабочего участка установлена медная трубка, по которой прокачивается вода заданной температуры. Для создания пузыря используется игла, через которую с помощью шприца подается воздух. Рабочий участок устанавливается на гониометр для позиционирования относительно горизонта. Для компенсации расширения пузыря при испарении жидкости рабочий участок соединен с другим резервуаром с постоянным уровнем рабочей жидкости. Динамика пузырька под нагретой подложкой визуализируется при помощи оптической теневой методики.

На рис. 2 представлена серия теневых изображений растущего парогазового пузыря под нагреваемой подложкой. Верхняя темная полоса на изображениях — подложка, а нижняя — медная трубка. Пузырь создается иглой через некоторое время после включения нагрева. Время указано с момента всплытия пузырька воздуха к подложке. Начальный объем образовавшегося пузыря под подложкой варьируется от 2 до 8 мм<sup>3</sup>. Далее пузырек начинает расти за счет испарения жидкости, при этом меняется состав газовой фазы внутри него. Видно, что через некоторое время под подложкой образуются и другие пузырьки пара. Эти пузырьки пара могут сливаться как друг с другом, так и с основным парогазовым пузырем.

На рис. 3 представлен график динамики объема пузырьков при различной мощности нагрева. Видно, что с увеличением мощности нагрева скорость роста пузырьков значительно увеличивается.

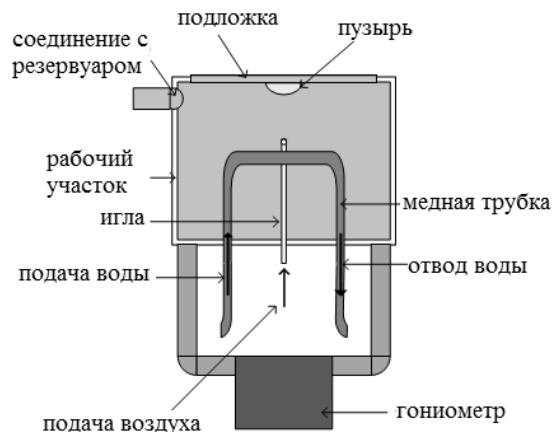


Рис. 1. Рабочий участок.

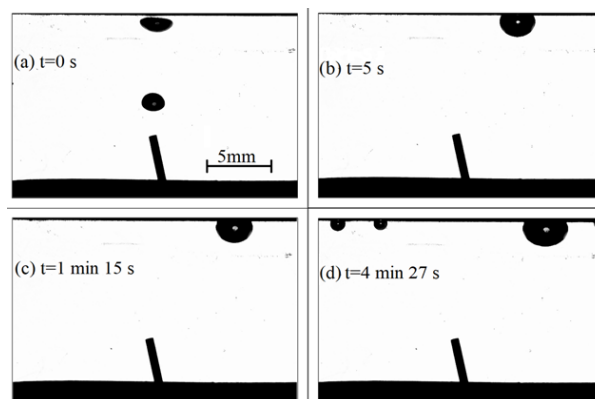


Рис. 2. Динамика парогазового пузыря под нагреваемой подложкой.

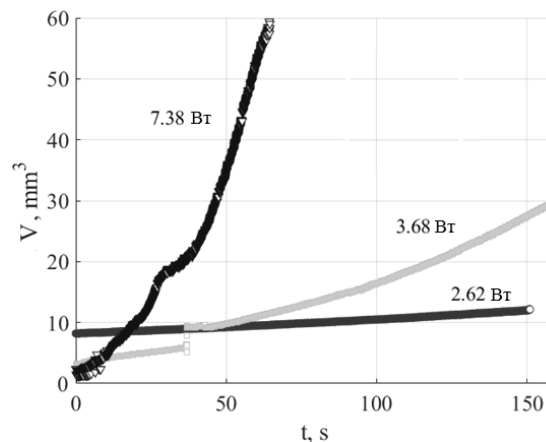


Рис. 3. Динамика объема пузырька при различной мощности нагрева.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Государственного фонда естественных наук Китая в рамках научного проекта № 21-58-53050.



УДК 536.25

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ КОРИУМА С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОГО ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ И ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ

Кудров А.И.<sup>1</sup>, Шеремет М.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

<sup>2</sup>Томский государственный университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

### Введение

Кориум – это высокорadioактивный расплав активной зоны ядерного энергетического реактора, образующийся в результате тяжелой аварии на атомной станции. На сегодняшний день существуют две стратегии локализации последствий такой аварии: стратегия внутрикорпусного удержания и ловушка расплава. Реализация последней требует проектных решений, и в ранних проектах АЭС она не предусмотрена, в таком случае альтернативой может служить внутрикорпусная локализация, предполагающая удержание расплава в корпусе реактора, который в свою очередь охлаждается снаружи. При этом из-за остаточного тепловыделения кориум начинает совершать свободноконвективное движение. Изучение данного процесса является перспективным направлением исследований, позволяющим определить возможность реализации данной концепции на той или иной атомной станции или пути модернизации существующих проектов внутрикорпусной локализации. Немаловажную роль в изучении данного процесса занимает численное моделирование, так как проведение натурных экспериментов является крайне затруднительным.

В последнее время опубликовано большое количество работ по численному моделированию естественной конвекции кориума, однако большое их количе-

ство было проведено при постоянных свойствах расплава, хотя известно, что переменные свойства могут оказывать влияние на параметры естественной конвекции. Поэтому в данной работе исследуется влияние переменной вязкости на среднее число Нуссельта на нижней стенке полуцилиндрической полости, в которой удерживается кориум, при условии переменного во времени тепловыделения в расплаве.

### Математическая постановка задачи

Предполагается, что кориум удерживается в горизонтальной полуцилиндрической полости, стенки которой поддерживаются при постоянной температуре. В начальный момент времени кориум неподвижен и имеет температуру, равную температуре на границе области. Из-за удельного тепловыделения в расплаве под воздействием силы тяжести в полости развивается свободноконвективное движение, описываемое системой безразмерных уравнений в приближении Буссинеска в полярных координатах с использованием преобразованных переменных «завихренность – функция тока». При этом полагается, что динамическая вязкость расплава убывает с ростом температуры экспоненциально, а удельное тепловыделение описывается законом Вэя-Вигнера. Данная система уравнений представлена далее:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + \frac{\partial(U\Omega)}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial(V\Omega)}{\partial \varphi} + \frac{U\Omega}{R} &= \sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \left( \frac{\partial^2(M\Omega)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial(M\Omega)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial(M\Omega)}{\partial \varphi^2} \right) + \\ + 2\sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \left[ \frac{1}{R} \frac{\partial^2 M}{\partial R^2} \left( V - \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial R} \left( \frac{\partial M}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 M}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{2}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \left( \frac{\partial^2 M}{\partial R \partial \varphi} - \frac{1}{R} \frac{\partial M}{\partial \varphi} \right) \right] + \frac{\partial \theta}{\partial R} \cos \varphi - \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \frac{\sin \varphi}{R}, \\ \frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} &= \Omega, \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{V}{R} \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} &= \frac{1}{\sqrt{\text{Pr Ra}}} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{(\tau^{-0.2} - (\tau + \tau_p)^{-0.2})}{(\text{Pr Ra})^{0.4}}. \end{aligned}$$

Граничные и начальные условия для уравнений, представленных выше, имеют вид:

$$\tau = 0, R \in [0, 1], \varphi \in [0, \pi]; \quad \Psi = \theta = \Omega = 0;$$

$$R = 0; \quad \Psi = \Omega = \theta = 0;$$

$$R = 1; \quad \Psi = \theta = 0, \quad \Omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2};$$

$$\varphi = 0 \text{ и } \varphi = \pi; \quad \Psi = \theta = 0, \quad \Omega = \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2}.$$

### Заключение

По результатам численного анализа были построены временные зависимости среднего числа Нуссельта на нижней границе полости для большого числа определяющих параметров. Для изучения структуры конвективных течений и поля температуры в полости были проанализированы распределения линий тока и изотерм. Также было проведено сравнение результатов, полученных при постоянной и переменной вязкости.

*Работа выполнена при поддержке программы развития Томского политехнического университета (Приоритет-2030-НИП/ЭБ-002-0000-2022).*

УДК 544.452

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНОГО ПОРОШКОВОГО ТОПЛИВА УГОЛЬ-ОПИЛКИ****Кузнецов А.В.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Рассмотрены основные типы растительного сырья, пригодные для энергетического использования. По совокупности параметров: максимальная теплота сгорания 21,1 МДж/кг и содержание лигнина 31,4%, минимальное содержание золы 2,06%, высокое содержание углерода и водорода, выбран основной объект дальнейших исследований – сосновый опил. Получены образцы соснового опила, обработанного при различной интенсивности механического воздействия на мельницах со стесненным и свободным ударом, при различном содержании влаги в образцах. Изучены особенности структуры образцов соснового опила (дисперсность частиц, индекс кристалличности методом рентгеновской дифракции).

Образование композитных частиц при совместной механической обработке угля и соснового опила и определение их свойств проведены с использованием современных физико-химических методов и методик. Композитные частицы с размерами менее 100 мкм характеризуются разупорядоченной волокнистой структурой древесины сосны с распределенными микрочастицами угля. Удельная поверхность композитных частиц составляет 2,9 м<sup>2</sup>/г, степень кристалличности целлюлозы – до 40%.

В дальнейшем, проводились исследования физико-химических процессов протекающих при воспламенении и горении полученного композитного топлива с использованием ряда оригинальных экспериментальных установок: вертикальной трубчатой печи с оптической регистрацией задержки времени воспламенения пылевидных частиц [1], вихревого горелочного устройства мощностью 50 кВт, установки для определения пределов распространения пламени по пылевоздушным смесям, лабораторной печи для сжигания топлива в виде прессованных таблеток. Для оценки влияния механохимического получения композитного топлива на процесс горения проводилось сравнение с другим топливом идентичного размера: со смесью аналогичного технического и элементного состава, углем и опилками сосны.

Методом синхронного термического анализа показано, что горение образцов осуществляется в две основные стадии. На первой происходит выделение и горение газообразных продуктов, на второй стадии окисляется продукт первой стадии – углерод. Увеличение содержания угля в композите приводит к смещению максимумов скоростей разложения на первой стадии в область более высоких температур, происходит уменьшение величины разложения на первой ступени и увеличение на второй. Установлена связь между максимумами скоростей горения и тепловым

потоком в зависимости от индекса кристалличности образцов.

В вертикальной трубчатой печи исследована минимальная температура и время задержки воспламенения образцов в зависимости от размера, степени разупорядочения, состава частиц. Минимальное значение времени задержки воспламенения - для образцов, полученных на устройствах для механической обработки со стесненным ударом и характеризующихся средним (62%) или пониженным (54%) индексом кристалличности ИК. Образцы с повышенным ИК (68%) минимальных значений времени задержки не воспламеняются. Образцы с минимальным индексом кристалличности (наибольшей степенью аморфизации целлюлозы) более активны на стадии воспламенения. Время задержки воспламенения композитного топлива имеет нелинейную зависимость от соотношения между компонентами. При всех исследованных температурах в вертикальной трубчатой печи значение времени задержки воспламенения для композита меньше, чем для других образцов (смесь, уголь, опилки). Минимальное значение температуры воспламенения соответствует содержанию 70% угля и 30% опилок.

Проведено экспериментальное исследование воспламенения, газификации и факельного горения выbranнх образцов на стенде тепловой мощностью до 50 кВт. Обнаружено, что температуры горения смеси и композитного топлива выше, чем опилок. Композит горит лучше смеси – начинается горение раньше, зона горения смещена к центру, что способствует увеличению полноты сгорания топлива. При стационарном протекании процесса горения температуры при сжигании композитного топлива выше, чем в случае горения смеси. При сжигании композитного топлива по сравнению со сжиганием смеси компонентов того же состава первая стадия начинается раньше, чем при использовании смесового топлива и происходит при температурах на 50–100°C выше. Горение на второй стадии происходит примерно одновременно как для смеси компонентов, так и для композитного топлива, но горение композита обеспечивает температуры на 100–400°C выше.

## Список литературы:

1. Kuznetsov A V, Butakov E B. Experimental study of thermal decomposition of mechanochemical formations of solid fuel // Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1677: 012111.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ  
и Правительства Новосибирской области  
грант № 22-29-20280.*

УДК 532.546

## ТЕПЛОФИЗИКА ФАЗОВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА МАЛЫХ И СВЕРХМАЛЫХ МАСШТАБАХ. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Кузнецов В.В.

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

Одной из основных проблем, сдерживающих применение компактных энергетических установок в различных областях техники, является недостаточная изученность гидродинамики и процессов теплопереноса в экстремальных условиях [1]. В данной работе представлены результаты исследований теплофизики фазовых и химических превращений в малоразмерных системах, рассмотрено применение полученных результатов в технологиях сжижения природного газа, системах охлаждения, МЭМС и аппаратах водородной энергетики.

Представлены новые результаты в области гидродинамики и процессов теплообмена при фазовых превращениях в малоразмерных системах. Рассмотрена капиллярная гидродинамика газожидкостного течения в микроканалах и пористых средах, экспериментально установлена локальная структура и обсуждены новые подходы к расчету течений в данных условиях. Установлены физические механизмы теплообмена в сложных канальных системах структурных насадок, учитывающие многомасштабную гидродинамику течений, рассмотрены закономерности и методы расчета процессов теплообмена при кипении и конденсации в микроканалах в условиях малых тепловых потоков. Получено, что направленная деформация поверхности пленки жидкости капиллярными силами и интенсификация теплообмена в окрестности контактной линии приводят к значительному увеличению коэффициентов теплоотдачи при испарении и конденсации. Численно определены условия формирования сухих пятен и увеличения коэффициента теплоотдачи в окрестности контактной линии при испарении. Применительно к разработке микроканальных систем отвода тепла от теплонапряженных зон энергетического оборудования и электронных устройств установлены физические механизмы и разработан метод расчета теплообмена при кипении недогретой и насыщенной жидкости в условиях вынужденной конвекции, учитывающий совместно вклад двухфазной вынужденной конвекции, подавления пузырькового кипения и испарения волновой пленки жидкости. Обоснованы методы повышения критической тепловой нагрузки для кипения в микроканальных и микроструйных системах охлаждения.

Рассмотрены особенности взрывного кипения метастабильной жидкости на микронагревателе при импульсном тепловом воздействии, направленные на обоснование МЭМС на основе управляемого распада жидкости. С использованием оригинальной оптической методики установлены характеристики пузырькового распада широкого класса жидкостей и смесевых композиций при скорости роста температуры до

1ГК/с, разработан метод расчета самосогласованного зародышеобразования и роста паровых пузырей в наведённом ими поле давления с учетом неоднородности поля температуры и неравновесности фазового перехода. Приведены результаты экспериментального и численного исследования взрывного кипения на наноструктурированном нагревателе, установлены условия перехода к спинодальному распаду однокомпонентных и бинарных систем, разработаны методы управления взрывным фазовым переходом в микро-размерных системах.

Новым направлением в химической технологии является применение компактных реакторов-теплообменников. Рассмотрены многостадийные физико-химические превращения при конверсии углеводородов в неизотермических условиях в каталитических топливных процессорах водородной энергетики. Разработаны компактные реакторы, основанные на применении микроструктурного катализатора для проведения синтеза Фишера – Тропша, позволяющие получать высокомолекулярные углеводороды из синтез-газа. Установлена кинетика и полнота низкотемпературного синтеза Фишера – Тропша и высокотемпературной конверсии природного газа в микроструктурных реакторах-теплообменниках. Изучены механизмы и разработаны методы расчета химических превращений при неравновесной паровой конверсии углеводородов в микроструктурных реакторах-теплообменниках, предложены методы интегрирования потоков тепла и продуктов реакции для повышения их эффективности, методы улавливания CO<sub>2</sub> в процессе конверсии, определены условия высокой конверсии водородсодержащего газа в жидкие и твердые углеводороды в микроканальных многофазных реакторах.

Обсуждено применение полученных результатов для повышения эффективности теплообменного оборудования систем сжижения природного газа, криогенных разделительных установок, систем охлаждения теплонапряженного оборудования, МЭМС на основе управляемого распада метастабильной жидкости, реакторах-теплообменниках водородной и атомно-водородной энергетики.

### Список литературы:

1. Kuznetsov V.V. Heat and mass transfer with phase change and chemical reactions in microscale // Proc. Int. Heat Trans. Conf. IHTC14. Washington, D.C., 2010. Paper 225701211.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (121031800215-4) и за счет гранта Российского Научного Фонда (проект № 21-19-00626).*

УДК 536.242

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ АЗОТА НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЯХ

Кузнецов Д.В., Павленко А.Н.

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

Несмотря на широкое разнообразие различных технологий создания функциональных поверхностей, в настоящее время ведётся активный поиск наиболее оптимальных для практического использования методов модификации, а также морфологии поверхности и геометрических параметров структур применительно к задачам интенсификации теплообмена и увеличения критических тепловых потоков при кипении различных жидкостей при заданных приведенных давлениях. Одним из перспективных способов создания пористых покрытий с толщиной от долей до сотен микрометров является метод микродугового оксидирования (МДО). Покрытия, полученные данным методом, представляют собой пористую керамику сложного состава, которая включает элементы электролита. Однако в литературе практически отсутствуют работы, посвященные исследованию особенностей теплообмена и развития кризисных явлений при кипении жидкостей на МДО-покрытиях.

После открытия высокотемпературной сверхпроводимости стало ясно, что в перспективе многие сверхпроводниковые приборы и устройства, кабельные линии могут успешно криостатироваться жидким азотом. Так, например, в монографии [1] представлены обширные сведения о теплообмене при кипении азота применительно к проблеме криостатирования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). В этой связи непосредственный интерес представляет исследование методов интенсификации теплообмена и увеличения критических тепловых потоков при кипении жидкого азота.

Целью настоящей работы является исследование влияния покрытий с различной микроструктурой, полученных методом микродугового оксидирования, на теплообмен при кипении жидкого азота в условиях стационарного тепловыделения при естественной конвекции на плоских нагревателях при атмосферном и пониженных давлениях.

В качестве рабочих участков использовались пластины из дюралюминия Д16Т. Покрытие на исходную поверхность наносилось методом микродугового оксидирования [2]. В экспериментах использовалось два нагревателя с МДО покрытиями:

**Образец №1:** электролит – КОН 4 г/л + натриевое жидкое стекло 8 г/л; токи анодный/катодный 24/24 А/дм<sup>2</sup>; частота импульсов 1500 Гц; время обработки 10 мин.

**Образец №2:** электролит – Na<sub>5</sub>P<sub>3</sub>O<sub>10</sub> 20 г/л; токи анодный/катодный 5/3 А/дм<sup>2</sup>; частота импульсов 500 Гц; время обработки 40 мин.

SEM фотографии структуры полученных образцов представлены на рисунке (образец №1 – слева, образец №2 – справа).

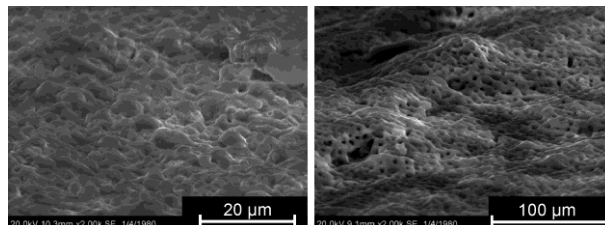


Рис. 1. SEM фотографии участков с МДО-покрытиями.

В работе показано, что:

- при атмосферном давлении наличие таких покрытий приводит к интенсификации теплообмена на 50–60% по сравнению с гладким образцом. При этом для покрытия с высокой плотностью пор, полученного при использовании триполифосфата натрия в качестве электролита, величина интенсификации практически не меняется при изменении теплового потока. В то время как для второго модифицированного образца (гидроксид калия в качестве электролита) наблюдалась тенденция снижения интенсификации при увеличении мощности тепловыделения;

- при всех исследованных давлениях отсутствует существенное влияние МДО покрытий на величину критического теплового потока, равно как и на интенсивность теплообмена при пониженных давлениях (0.05 МПа и 0.017 МПа) по сравнению с гладким участком;

- основным механизмом увеличения коэффициентов теплоотдачи на модифицированных образцах при атмосферном давлении является увеличение плотности центров парообразования. Снижение давления приводит к отсутствию разницы в динамике парообразования на гладком и модифицированных нагревателях, увеличению температурного напора, при котором происходит переход от конвекции к развитому пузырьковому кипению, и увеличению отрывных диаметров пузырей.

Список литературы:

1. Теплообмен при кипении азота и вопросы охлаждения высокотемпературных сверхпроводников / Кириченко Ю.А., Козлов С.М., Русанов К.В., Серегин В.Е., Троянов А.М., Тюрина Е.Г. Научная думка, Киев, 1992, 592 с.
2. Никифоров А.А. Метод микродугового оксидирования// Патент No. С2 2389830, 2008.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации (договор No. 075-15-2020-770).*

УДК 662.61

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КИСЛОРОДНОГО СЖИГАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОМ КОТЛЕ

Кузнецов В.А.<sup>1,2</sup>, Божеева Д.М.<sup>1</sup>, Дектерев А.А.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,

660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Одним из основных источников получения электроэнергии являются тепловые электростанции, работающие на органическом топливе (уголь, мазут, газ, сланцы, торф и т.п.) [1]. В свою очередь сжигание углеводородного топлива приводит к увеличению выбросов оксидов углерода, оксидов азота и других вредных выбросов в атмосферу [1–4]. Рост эмиссии парниковых газов в атмосферу влечёт за собой воздействие на климат Земли.

Самым эффективным способом по снижению выбросов парниковых газов является переход на возобновляемую энергетику (солнечная, гидро-, ветро-, геотермальная и т.д.) [5]. Но для полного перехода на безуглеродные возобновляемые энергетические технологии, покрывающие потребности населения, потребуется время. Стоит также учитывать, что тенденция роста потребления электроэнергии из года в год сохраняется.

Поэтому необходимо в ближайшей перспективе развивать и разрабатывать технологии эффективной переработки углеводородного топлива, позволяющие минимизировать вредные выбросы в атмосферу, в том числе снижающие углеродный след.

Прогнозы показывают [1], что технология улавливания и хранения углерода (*carbon capture and storage – CCS*) будет играть важную роль во второй половине 21 века. По прогнозам к 2100 году 40% мировой электроэнергии будет получено с использованием технологии *CCS* (из них одна третья часть из угля *CCS*, остальные две трети из газа *CCS*).

Таким образом интерес представляют технологии сжигания углеводородного топлива, способствующие улавливанию  $CO_2$ , которые можно будет применить для существующих энергетических установок. Одной из таких является кислородное сжигание углеводородного топлива в безазотной среде при наличии рециркуляции дымовых газов.

В данной работе проведено численное исследование зависимости физико-химических процессов от характеристик среды и режимных параметров при кислородном сжигании пылеугольного топлива в опытно-промышленном котле. Разработана численная методика математического описания физико-химических процессов горения пылеугольного топлива в среде  $O_2-CO_2-H_2O$  для полномасштабных промышленных установок.

Был выбран котел БКЗ 500-140-1, действующий на Красноярской ГРЭС, с производительностью пара 500 т/ч при давлении  $P=140$  бар и температуре  $T=560^\circ C$ . В качестве топлива для работы котла используются бурые угли Сибирского региона. Топка оборудована двенадцатью прямоточными пылеугольными горелками, расположенными в углах топки в

три яруса. Серийная печь имеет горизонтальное сечение  $11.26 \times 10.26$  м, высоту 34.8 м, общий объем  $3770$  м<sup>3</sup>. На стенках реализован теплоотвод через экранные трубы.

Проведены исследования влияния характеристик дутья на условия сжигания пылеугольного топлива в опытно-промышленном котле. На рисунке 1 представлены некоторые результаты расчёта. Получена зависимость температурного режима, теплового потока на стенках, концентрации оксидов азота, эффективности сжигания от концентрации кислорода и влаги в дутье.

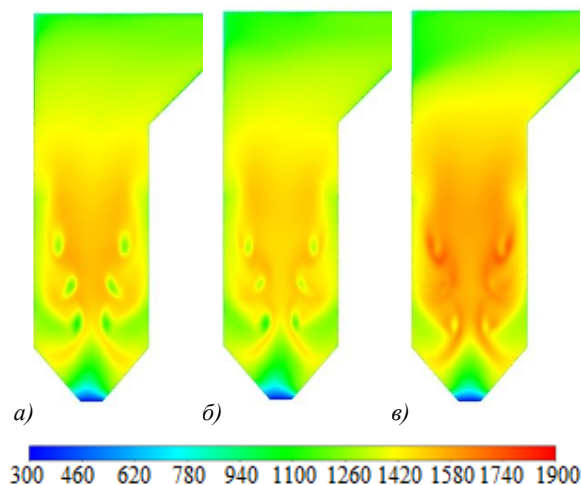


Рис. 1. Температура (K) в центральном сечении котла: а)  $O_2 - 15.4\%$  (воздушное дутьё), б)  $O_2 - 19.75\%$ , в)  $O_2 - 23.6\%$  (об.).

## Список литературы:

1. Morris J, Kheshgi H, Paltsev S, Herzog H. Scenarios for the deployment of carbon capture and storage in the power sector in a portfolio of mitigation options. *Clim Chang Econ* 2021;12:2150001.
2. Bello OW, Zamani M, Abbasi-Atibeh E, Kostjuk LW, Olfert JS. Comparison of emissions from steam- and water-assisted lab-scale flames. *Fuel* 2021;302:121107.
3. Wei H, Yao C, Pan W, Han G, Dou Z, Wu T, et al. Experimental investigations of the effects of pilot injection on combustion and gaseous emission characteristics of diesel/methanol dual fuel engine. *Fuel* 2017;188:427–41.
4. Kumar D, Kumar D. *Coal Usage and Control of CO2 Emissions*. Sustain. Manag. Coal Prep., Elsevier; 2018, p. 15–33.
5. Timilsina GR. Are renewable energy technologies cost competitive for electricity generation? *Renew Energy* 2021;180:658–72.

Работа выполнена лабораторией низкоуглеродной металлургии и энергетики в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» организации-участника НОЦ «Енисейская Сибирь» в рамках национального проекта «Наука и университеты», номер проекта FSRZ-2021-0010.

УДК 532.546

## МНОГОМАСШТАБНАЯ ГИДРОДИНАМИКА ПРИ ВЫТЕСНЕНИИ НЕФТИ С РАЗЛИЧНОЙ ВЯЗКОСТЬЮ ВОДОЙ В СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Кузнецов В.В.

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

Разработка нефтяных и газовых месторождений в России проводится с использованием закачки воды и растворов реагентов, способствующих увеличению охвата пласта заводнением, увеличению нефтеотдачи и увеличению дебита скважин. Несмотря на высокую эффективность закачки воды для интенсификации добычи нефти, существует ряд проблем, снижающих эффективность данного метода, в особенности для слоисто-неоднородных пластов с высоковязкой нефтью. Это наиболее явно проявляется при разработке сложнопостроенных залежей высоковязкой нефти, для которых характерным является неравномерное движение водонефтяного контакта и формирование целиков нефти в промытых водой зонах [1]. Для таких залежей необходима разработка новых методов добычи нефти, учитывающих строение коллектора и использующих капиллярные явления, способствующие более равномерному движению фронта вытеснения. В данной работе приведены результаты исследования многомасштабной гидродинамики несмешивающегося вытеснения нефти с повышенной вязкостью водой в двухслойной пористой среде с различной проницаемостью пропластков с учетом влияния капиллярных сил на макромасштабе.

Известно, что влияние капиллярных сил на макромасштабе приводит к формированию стабилизированной зоны, размер которой существенно превышает размер пор [1]. Устойчивость фронта вытеснения и развитие макромасштабных «пальцев» при вытеснении вязкой углеводородной жидкости водой в слоисто-неоднородных пористых средах исследована в рамках математической модели двухфазной фильтрации Маскета-Левретта, записанной в переменных эффективная насыщенность вытесняющей жидкости  $S$ . С учетом дифференциальных соотношений на изолиниях постоянной насыщенности вытесняющей фазы, определена скорость переноса изолинии с учетом ее кривизны и макромасштабной капиллярной диффузии. Получено, что неравномерность суммарной скорости фильтрации в слоистой среде приводит к деформации изолиний насыщенности, которая подавляется поперечными капиллярными перетоками.

В пределах стабилизированной зоны, скорости переноса изолиний совпадают со скоростью переноса фронтальной насыщенности. С учетом этого, получено уравнение для переноса фронта вытеснения в пропластках, учитывающее его кривизну вследствие различной скорости распространения фронта в головной и хвостовой частях растущего «пальца». Получено, что капиллярные перетоки вдоль искривленного фронта вытеснения, возрастающие при увеличении длины «пальца», стабилизируют его длину.

Аналитически получено выражение для формы «пальца» в высокопроницаемом и малопроницаемом

пропластках, получена его длина  $l_f$  для вытеснения, стабилизированного капиллярными силами. На рис. 1

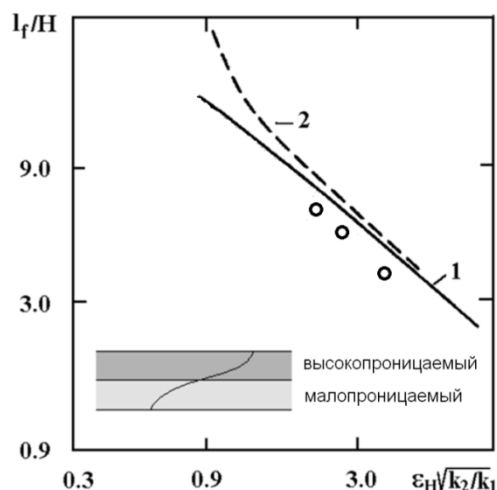


Рис. 1. Предельная длина «пальца» в двухслойной пористой среде при  $k_* = 0,1$ ,  $H/L = 0,1$ ,  $m_* = 1$ ,  $h = 0,5$ : 1 —  $\mu_0 = 0,1$ ; 2 —  $\mu_0 = 1$ ; точки — численный расчёт при  $\mu_0 = 0,1$ .

приведено сравнение предельной длины «пальца» в зависимости от параметра  $\varepsilon_H \sqrt{k^*}$  для двух значений отношение вязкости вытесняющей и вытесняемой жидкости  $\mu_0 = \mu_1/\mu_2$  в двухслойной пористой среде при  $k_* = 0,1$ ,  $H/L = 0,1$ ,  $m_* = 1$ ,  $h = 0,5$ . Линиями показан аналитический расчет для 1 —  $\mu_0 = 0,1$ ; 2 —  $\mu_0 = 1$ , точки показаны численный расчет [2] при  $\mu_0 = 0,1$ . Здесь  $\varepsilon_H = \sigma \sqrt{k_1 m_1} / u_0 \mu_1 H$ ,  $u_0$  — скорость фильтрации на входе,  $k_1$ ,  $m_1$  — проницаемость и пористость высокопроницаемого пропластка, индекс \* показывает отношение данных величин для пропластков,  $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $L$  — длина и  $H$  — ширина. Расчеты проведены для функциональных параметров  $k_1(S) = S^2$ ,  $k_2(S) = (1 - S)^2$ ,  $J(S) = 1 - S$ . Как видно, численные расчеты предельной длины языков хорошо соответствуют значениям длины языка  $l_f$ , полученным из приближенного решения, и влияние вязкости наиболее сильно проявляется для малых значений параметра  $\varepsilon_H \sqrt{k^*}$ , когда капиллярные перетоки малы.

### Список литературы:

1. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г.И. Баренблатт, В.М. Енгов, В.М. Рыжик. М.: Недра, 1984. 211 с.
2. Kuznetsov V.V., Safonov S.A. Multi-scale flow patterns during immiscible displacement of oil by water in a layer-inhomogeneous porous media / J. Phys: Conf. Ser. 2021. V. 2119. P. 012048.

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

УДК 536.46

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВОДОРОДА В МИКРОСТРУКТУРНОМ РЕАКТОРЕ-ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Кузнецов В.В., Гасенко О.А.

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

Водород является перспективным теплоносителем низкоуглеродной экономики. В связи с принятой программой использования водорода в энергетике и на транспорте, большое значение приобретает разработка технологий каталитической конверсии углеводородного топлива для получения водорода в компактных реакторах-теплообменниках, интегрированных с топливными элементами. Процессы конверсии в реакторах-теплообменниках происходят в неизотермических условиях, поэтому оптимизация теплового режима является критически важной для повышения их энергетической эффективности. Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей физико-химических и тепловых процессов при паровой конверсии метана в микроструктурных реакторах-теплообменниках на основе микроканалов.

Для проведения процессов конверсии метана в микроканальном реакторе-теплообменнике разработан тонкослойный композитный катализатор, состоящий из буферного слоя оксида титана, нанесенного на поверхность микроканалов, слоя носителя катализатора и слоя нанесенного на носитель катализатора на основе родия. Катализатор на основе металлических носителей обладает высокой теплопроводностью и может быть использован для проведения каталитического горения и паровой конверсии метана в сопряженных каналах реактора-теплообменника. Существенно улучшить активность катализатора позволяет метод механохимической активации, используемой, как на стадии приготовления катализатора, так и на стадии приготовления суспензии для формирования каталитического слоя. Использование механохимической активации позволило синтезировать высокодисперсный и однородный катализатор с интервалом размеров частиц родия от 1 до 3 нм. На основе серии экспериментов, выполненных с использованием кольцевого микрореактора, описанного в [1], в предположении, что скорость гетерогенной реакции определяется зависимостью Аррениуса, установлены кинетические параметры для реакций, протекающих одновременно в процессе конверсии и получения обогащенного водородом синтез-газа.

Численное исследование физико-химических и тепловых процессов при паровой конверсии метана в щелевом микроканале проведено с использованием полных стационарных уравнений Навье-Стокса для ламинарного многокомпонентного сжимаемого газа [2]. Для моделирования кинетики паровой конверсии метана применялся трех шаговый механизм, включающий реакции паровой конверсии (1), метанации (2) и сдвига (3) с экспериментально определенными кинетическими параметрами реакций. Расчеты проводи-

лись конечно-разностным методом. В результате расчетов получена детальная информация о структуре полей концентраций компонент по длине зоны реакций, скоростям химических превращений в зависимости от температуры реакции, определены температурные режимы с высокой конверсией.

Для определения температурных режимов с высокой конверсией проведены расчеты для различных законов изменения теплового потока по длине реактора. На рис. 1 приведено изменение температуры катализатора по длине микроканального реактора при постоянной температуре катализатора, линия (1), при постоянном тепловом потоке по длине реактора, линия (2), и при линейно спадающем тепловом потоке, линия (3). Как видно, наиболее эффективным является линейно спадающий тепловой поток, так как в этом случае температура катализатора наиболее приближена к постоянной и нет излишних затрат энергии на нагрев продуктов реакции вне зоны интенсивных реакций конверсии. Повышение энергоэффективности может быть достигнуто также при использовании переменной загрузки катализатора по длине реактора.

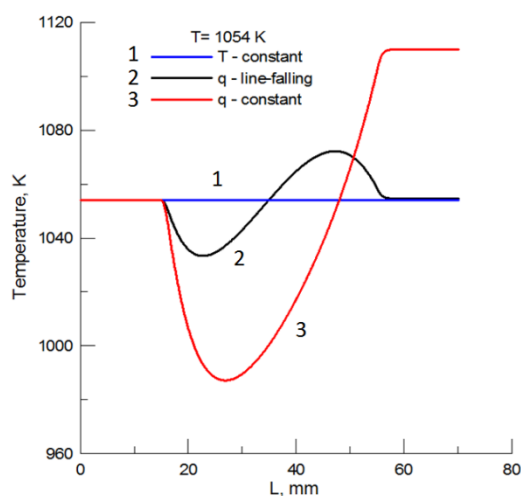


Рис. 1. Изменение температуры катализатора по длине микроканального реактора при постоянной температуре катализатора (1), при постоянной плотности внешнего теплового потока  $2.5 \text{ кВт/м}^2$  (2) и при линейно спадающем тепловом потоке (3).

### Список литературы:

1. Kuznetsov V.V., Vitovsky O.V., Gasenko O.A. Methane steam reforming in an annular microchannel with Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst // J. Eng. Thermophys. 2009. V. 18. P. 187–196.
2. Kozlov S.P., Kuznetsov V.V. Heat and mass transfer in the initial microchannel section with chemical conversions of methane in water vapor // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2012. V. 53. № 1. P. 74–82.

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

УДК 614.841

## ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Кузнецов Г.В.<sup>1</sup>, Копылов Н.П.<sup>2</sup>, Кропотова С.С.<sup>1</sup>, Жданова А.О.<sup>1</sup>, Стрижак П.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» МЧС России 143903, Россия, Московская область, Балашиха, микрорайон ВНИИПО, 12

При решении практических задач оценки токсичности продуктов горения различных материалов, степени загазованности помещений и окружающего общественного здания и сооружения пространства требуется определить интенсивность выбросов в атмосферу продуктов горения и их состав:

$$Q_i = C_i \cdot m_i$$

где  $Q_i$  – интенсивность выброса  $i$ -го продукта;  $C_i$  – массовая доля  $i$ -го продукта;  $m_i$  – массовая скорость выгорания материала.

Для определения состава продуктов и значения  $C_i$  разработана методика.

При горении синтетических и природных полимеров образуются сложные многокомпонентные смеси летучих продуктов как органического, так и неорганического происхождения, обладающих различной степенью токсичности. Ввиду разнообразия продуктов горения анализ качественного, а тем более количественного состава представляет собой сложную химическую задачу. В настоящее время не разработано ни универсальной методики анализа, ни универсального прибора, с помощью которого этот анализ можно было бы провести. Данная задача может быть решена с неизменным привлечением нескольких современных физико-химических методов, таких, как газовая и газожидкостная хроматография [1], масс-спектрометрия, инфракрасная (ИК) и ультрафиолетовая (УФ) спектроскопия, спектроскопия в видимой области и др.

Изложены методология и принципы лабораторного исследования состава продуктов горения различных материалов с использованием таких инструментов, как газовая и газожидкостная хроматография, масс-эффузио-спектрометрия. Большое внимание уделено применяемым сорбентам в хроматографических колонках и их температурным режимам, а также способам приготовления образцов для исследований. Рассмотрены вопросы детектирования различных компонентов в смеси продуктов горения. Результаты исследований продуктов горения разных материалов представлены в табличной форме, при этом в скобках указаны рассчитанные индексы токсичности  $C_{см}$ , оцененные по литературным данным (смертельная для человека концентрация при получасовой экспозиции).

Представленные в таблице 1 данные по выходу компонентов дымового аэрозоля при сгорании раз-

личных материалов могут быть использованы при разработке средств защиты от отравления продуктами горения, в методиках по расчету зон загазованности территорий продуктами горения и решения других прикладных задач.

Табл. 1. Выход компонентов дымового аэрозоля при сгорании различных материалов (% мас.). Температура пиролиза 700°C, скорость потока воздуха 2 л.час<sup>-1</sup>.

Компонент	ДСП	Древесина с лакокрасочным покрытием
Водород	-	0,40
Оксид углерода	2,15(5,73)	2,05(5,46)
Диоксид углерода	68,6	72,4
Цианистый водород	-	-
Метан (360)	1,80(0,05)	2,40(0,007)
Этилен (1000)	0,80(0,010)	1,20(0,012)
Этан (500)	0,18(0,004)	0,30(0,006)
Пропилен (1000)	1,96(0,17)	1,68(0,017)
Ацетальдегид (50)	1,06(0,212)	0,80(0,16)
Ацетон (800)	0,50(0,006)	0,08(0,001)
Аллиловый + пропиловый спирт (5)	0,50(0,10)	0,18(0,36)
Уксусная кислота (40)	0,14(0,035)	0,11(0,028)
Бензол (70)	0,38(0,054)	0,67(0,096)
Толуол (40)	0,34(0,085)	0,38(0,095)
Ксилол (50)	0,14(0,028)	0,07(0,014)
Кумол (40)	0,05(0,013)	0,04(0,01)
Стирол (50)	0,19(0,038)	-
Нафталин (1, 2)	0,08(0,667)	-
Фенол (3)	0,10(0,333)	-
Крезол (1)	0,06(0,6)	-
Ксиленол (10)	0,01(0,01)	-
Метиловый спирт	0,80(0,08)	-
Бутилен	1,5(0,002)	0,18(0,002)

### Список литературы:

1. Практическая газовая хроматография: учебно-методическое пособие для студентов химического факультета по спецкурсу «Газохроматографические методы анализа» / Царев Н.И., Царев В.И., Катраков И.Б. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2000. 156 с.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 21-19-00009, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00009/>).



УДК 532.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ГАЗОВОГО КОЛЬЦЕВОГО ГОРЕНИЯ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ И ФЛЕЙМЛЕТОВ

Кундашкин А.Д.<sup>1,2</sup>, Палкин Е.В.<sup>1</sup>, Хребтов М.Ю.<sup>1,2</sup>, Мулладжанов Р.И.<sup>1,2</sup>

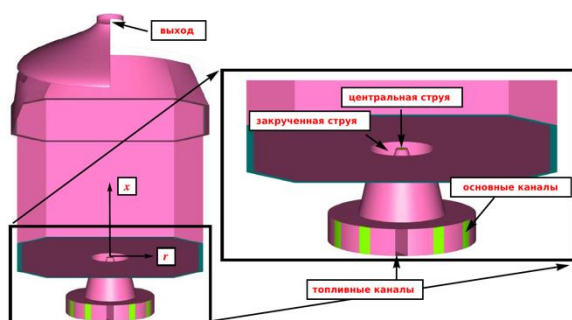
<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет  
e-mail: alexkundashkin@gmail.com

В современном мире и ближайшем обозримом будущем горение различных видов топлива все еще останется основным ресурсом добычи энергии для человечества. В связи с этим встают вопросы оптимизации расходов топлива при горении в различных двигателях. Также большую важность представляет оптимизация геометрии двигателей для более экономичного сгорания топлива с меньшим вредом для экологии.

В качестве примера попытки решения этих проблем можно выделить предварительно смешанного газового топлива, которое обеспечивает низкие выбросы оксидов азота и высокую топливную экономичность для многих устройств сгорания. Однако, стратифицированные смеси с неоднородной концентрацией топлива дают лучшую стабильность пламени и воспламеняемость по сравнению с предварительно смешанным пламенем в условиях очень скудного топлива [1, 2] и часто намеренно используются в практических системах сгорания, например в двигателях со стратифицированным зарядом.

В данной работе исследуется изотермическая и реагирующая аэродинамика в модельной камере с двенадцатью закрученными входными потоками. Модель камеры сгорания состоит из цилиндрической форкамеры, модельного фронтного устройства и камеры сгорания. Ширина камеры сгорания составляет 180 мм. Фронтное устройство включает в себя радиальный завихритель потока и центральное сопло для подачи пилотного топлива. Была построена расчетная сетка, содержащая 13 млн ячеек.



Поля скоростей и распределение давлений были смоделированы с помощью модели табулированной химии (flamelet модель) и метода крупных вихрей, имплементированных в открытый пакет OpenFOAM.

На основе имеющихся экспериментальных данных была проведена валидация изотермических расчетов с различными расходами топлива.

Ранее было показано, что в реагирующем случае пламя прикреплено к поверхности сопла с углом соприкосновения, перемещающимся азимутально с основным закрученным потоком [3]. Также было продемонстрировано, что в пределах одного калибра поток имеет довольно устойчивую конфигурацию, где внешняя форма ограничена внешним слоем смешивания, а внутренний контур потока определяется тепловым расширением, которое предполагается распределением высокой температуры в зоне рециркуляции внутри вихревого ядра. Далее вниз по течению температурная изоповерхность имеет спиральную структуру, распространяющуюся с низкой частотой, что наблюдалось в предыдущих исследованиях в случае изотермического нижнего завихрения [4].

В дальнейших исследованиях было продемонстрировано, что введение дополнительной центральной струи позволяет осуществлять управление течением с целью подавления прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ), как в реагирующем, как и в изотермическом случае [5]. Однако, отмечено, что инжектирование с помощью центральной струи недостаточно эффективно, и с помощью теории возмущений были получены предполагаемые координаты сопла, инжекция в которых будет более эффективной для подавления ПВЯ.

В данной работе проведена серия изотермических и реагирующих расчетов для различных расходов топлива и различных расходов инжектируемого потока. Инжекция осуществлялась по окружности на разных высотах соплового устройства. Было показано, что наблюдается эффективное подавление ПВЯ уже при расходах инжекции порядка 1-5% от общего расхода топлива в камере. В реагирующих расчетах с инжекцией продемонстрировано лучшее сгорание топлива, а так же подавление ПВЯ, что делает пламя гораздо более устойчивым, чем без инжекции дополнительного топлива.

### Список литературы:

1. Poinso T., Veynante D. Theoretical and numerical combustion. – RT Edwards, Inc., 2005.
2. Pope S. B., Pope S. B. Turbulent flows. – Cambridge university press, 2000.
3. Hrebtov M. Y. et al. Large-eddy simulation of a reacting swirling flow in a model combustion chamber //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2119. – №. 1. – С.012031.
4. Hrebtov M Y, Palkin E V and Mullyadzhannov R I 2020 *J. of Phys.: Conf. Series*, 1677(1) 012012.
5. Palkin E. V. et al. Influence of a Central Jet on Isothermal and Reacting Swirling Flow in a Model Combustion Chamber //Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 5. – С. 1615.

УДК 621.9

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИКАЛА ОН В ОБРАЩЁННОМ ДИФфуЗИОННОМ ПЛАМЕНИ ВОДОРОДА

Лабусов С.В., Лукашов В.В., Тупикин А.В.

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

Диффузионное пламя можно классифицировать как нормальное диффузионное пламя (NDF), где поток топлива истекает в среду окислителя и обращённое диффузионное пламя (IDF), образованное струей окислителя, окружённой топливной атмосферой. IDF конфигурация обеспечивает более чистое сгорание, улучшение стабильности пламени и, по сравнению с предварительно смешанным пламенем, более широкие концентрационные пределы горения. Внутренняя структура IDF обладает своей спецификой. Результаты [1] указывают на два типа топологии областей реакции в зависимости от соотношения импульса окислителя к топливу: чисто диффузионная зона, расширяющаяся по внешней периферии струи, и центральная реакционная зона, где могут сосуществовать режимы без предварительного смешения и частично с предварительным смешением. Для анализа IDF адекватное разбиение реагирующего потока на области реагирования позволяет существенно упростить анализ. Целью данной работы было исследование структуры IDF при горении топливной смеси  $H_2/N_2$ . По оси горелочного устройства подавался кислород. Схема организации факела показана на Рис. 1. Экспериментальные исследования производились с помощью PLIF системы, состоящей из импульсного перестраиваемого лазера на красителях (Sirah Precision Scan), импульсного лазера накачки Nd:YAG (Quanta Ray) и чувствительной к ультрафиолетовому излучению усиленной камеры sCMOS. Лазерный луч был преобразован в лазерный лист с помощью коллиматора (LaVision). Перестраиваемый лазер на красителе возбуждал флуоресценцию ОН на длине волны перехода Q1(8). Выбор длины волны был обусловлен измерениями флуоресценции ОН, выполненными для той же экспериментальной установки в условиях реагирующего потока. Средняя энергия импульса при 283 нм составляла приблизительно 12 МДж. Чтобы учесть пространственную неравномерность распределения энергии в лазерном листе и изменение энергии каждого лазерного импульса, часть лазерного излучения (приблизительно 5 %) была направлена в калибровочную кювету, содержащую родамин 6G. Пространственное распределение сигнала флуоресценции внутри кюветы регистрировалось с помощью ПЗС-камеры (IMPERX Bobcat IGV-B4820, 16 мегапикселей, 12 бит). Интенсивность сигнала флуоресценции ОН регистрировалась с помощью камеры sCMOS (LaVision Imager sCMOS, 16-битные изображения с разрешением 2560×2160 пикселей), оснащённой УФ-чувствительным усилителем изображения (LaVision IRO). Усилитель изображения

также был оснащён УФ-объективом и полосовым фильтром ( $310 \pm 10$  нм). Время экспозиции изображений PLIF составляло 200 нс. Характерные изображения распределения

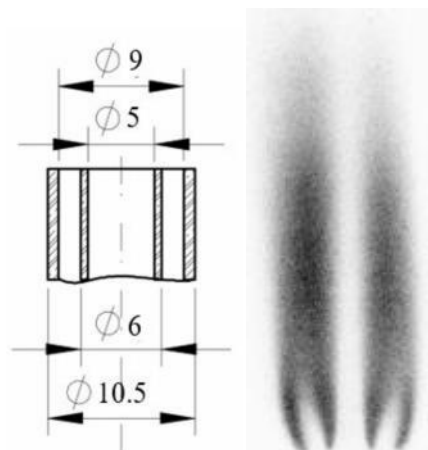


Рис. 1. Схема горелочного устройства (слева) и характерное распределение интенсивности свечения радикала ОН (справа) в водородно-кислородном пламени. Топливо  $H_2/N_2$ , 45% водорода.

интенсивности свечения радикала ОН в диаметральной плоскости показана на рис.1. На высоте 7.5 калибров, в зоне догорания, согласно сделанным оценкам максимальная температура в продуктах сгорания приближается к  $T \approx 3000$  К. Расчет состава, сделанный в предположении химического равновесия, показал, что область максимального содержания радикалов ОН соответствует и наибольшему содержанию в пламени окислов азота, атомарного водорода и кислорода. Длина факела и внутренняя структура пламени зависели как от расходных параметров (скоростей истечения), так и от состава топливной смеси (ее теплотворной способности). Меняя содержание водорода в топливе, и, подобрав скоростной режим, можно реализовать размыкание пламени на оси.

## Список литературы:

1. K. Utria, S. Labor, M. Kühni, D. Escudié и C. Galizzi, «Experimental study of  $H_2/O_2$  downward multi-fuel-jet inverse diffusion flames,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, т. 134, p. 110583, 2022

Работа выполнена при финансовой поддержке  
Министерства науки и высшего образования  
Российской Федерации. Федерации,  
грант № 075-15-2020-806 соглашение  
от 29 сентября 2020 г.

УДК 536.25

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ

Ласковец Е.В.

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

Точные решения, описывающие конвективные течения, имеют ценность ввиду возможности быстрого анализа влияния различных физико-химических факторов на характер исследуемых процессов. Значительный круг работ посвящен построению подобных решений, исследованию их устойчивости и сравнению полученных результатов с экспериментальными данными [1, 2]. Отдельно рассматриваются случаи учета таких усложняющих факторов, как тепло- и массоперенос, эффекты термодиффузии, диффузионной теплопроводности и другие.

В данной работе изучается влияние различных физических и геометрических характеристик системы на трехслойное течение системы «жидкость-жидкость-газ» в горизонтальном канале. Верхняя и нижняя стенки полагаются твердыми непроницаемыми, жидкости не смешиваются. На термокапиллярной границе раздела жидкость-газ принимаются во внимание процессы испарения или конденсации пара. В газопаровом слое учитываются эффекты Соре и Дюфура.

Математическое моделирование изучаемого процесса основано на точных решениях уравнений Обербека-Буссинеска следующего вида [3, 4]:

$$u_i = u_i(y), \quad v_i = 0, \quad T_i = (a_1^i + a_2^i y)x + \vartheta_i(y), \\ C = (b_1 + b_2 y)x + \varphi_i(y).$$

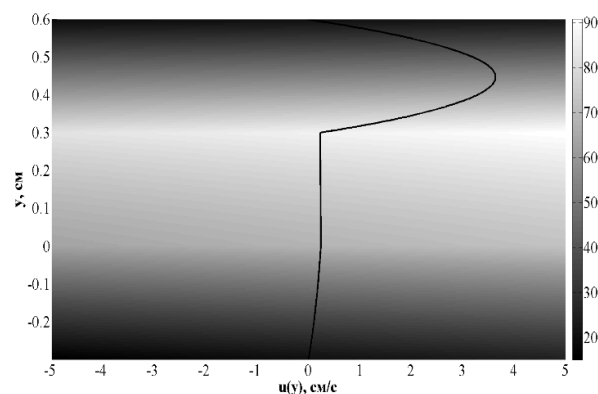
Здесь  $u, v$  — проекции вектора скорости на оси координат,  $T$  — температура,  $C$  — концентрация пара в верхнем слое системы. Коэффициенты  $a_j^i$  и  $b_j$  есть некоторые постоянные, индекс  $i = \overline{1, 3}$ , определяет принадлежность слою.

Постановка задачи дополнена граничными условиями на стенках канала и термокапиллярных границах раздела. На границе «жидкость-газ» учитывается процесс массопереноса (испарение или конденсация). В газопаровом слое полагается заданным расход газа. На верхней стенке канала рассматриваются два типа условий для концентрации пара: полная абсорбция пара или отсутствие потока пара [5, 6].

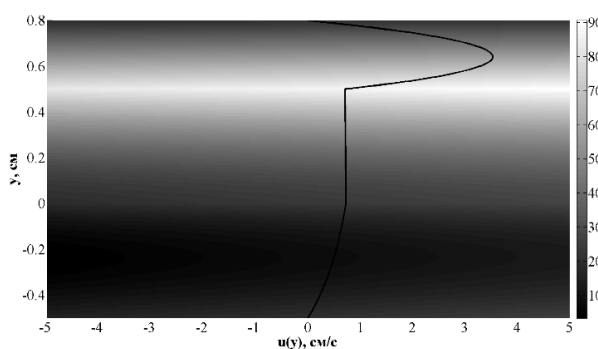
Построены точные решения задачи. Изучено влияние типа условий концентрации пара на верхней стенке канала, продольных градиентов температуры, расхода газа, толщины жидких и парогазового слоев на характер течений и интенсивность массообмена на границе «жидкость – газ».

Для исследования была выбрана система «силиконовое масло – вода – воздух». Рассмотрен случай, когда на верхней стенке канала выполнено условие полной абсорбции пара. Рисунок 1 демонстрирует зависимость характера течения от изменения толщин слоев жидкостей. При увеличении значений толщин слоев наблюдается более интенсивное охлаждение жидкостей (рисунок 1.б), в нижнем слое наблюдается формирование термоклина. В случае, когда толщины всех

слоев имеют равные значения (рисунок 1.а), течение жидкостей менее интенсивное, наименьших значений температура достигает на стенках канала.



а



б

Рис. 1. Влияние толщин жидких слоев на профили скорости и распределения температуры в канале: (а)  $h_1 = h_2 = 3 \cdot 10^{-3}$  м, (б)  $h_1 = h_2 = 5 \cdot 10^{-3}$  м.

### Список литературы:

1. Bekezhanova V.B., Goncharova O.N., Ivanova N.A., Klyuev D.S. Instability of a two-layer system with deformable interfaces under laser beam heating // J. of Siberian Federal University. 2019. V. 12(5). P. 543–550.
2. Гончарова О.Н., Кабов О.А., Люлин Ю.В., Резанова Е.В. Изучение конвективных течений жидкости и спутного потока газ с учетом испарения // ТВТ. 2017. №55(6). С. 720–732.
3. Остроумов Г.А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. Москва-Ленинград: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1952. 256 с.
4. Бирих Р.В. О термокапиллярной конвекции в горизонтальном слое жидкости // ПИМТФ. 1966. № 3. С. 69–72.
5. Rezanova E.V. Construction of exact solution describing three-layer flows with evaporation in a horizontal channel // J. of Siberian Federal University. 2021. Vol. 14, No 1. P. 57–68.
6. Laskovets E.V. Mathematical modeling of three-layer flows with evaporation based on exact solutions // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2119. 012049.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 22-11-00243.

УДК 532.542.4, 532.574.7, 532.582.3

## УПРАВЛЕНИЕ ОТРЫВОМ ПОТОКА ЗА ЦИЛИНДРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ СТРУИ

Лебедев А.С., Сорокин М.И.

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

Предмет управления отрывными течениями имеет огромное значения в различных инженерных приложениях. Умение пассивно или активно управлять потоком десятилетия активно исследуется учеными и инженерами. Потенциальными выгодами от реализации эффективных систем управления потоком варьируются от экономии миллиардов долларов на ежегодных расходах на топливо для наземных, воздушных и морских транспортных средств до получения экономически и экологически конкурентоспособных устройств и процессов так или иначе связанных с использованием потоков жидкости.

Целью данной работы является исследование активного метода управления отрывными течениями с использованием пульсирующей струи. В качестве тела обтекания был выбран поперечно обтекаемый круглый цилиндр, являющийся классическим модельным объектом, часто встречающимся в теплообменных устройствах. Исследования методов управления, проведенные на типовых объектах, востребованы для разработки методов управления для более сложных геометрий. Обилие теоретических и экспериментальных данных для круглого цилиндра позволяет провести достоверный сравнительный анализ эффективности новых методик управления отрывными течениями.

Метод управления отрывом потока с помощью периодического выдува широко представлен в литературе [1]. Интерес к данному методу возрастает с каждым годом, в литературе можно встретить исследования, направленные на изучение влияния положения точки выдува и силы выдува. Однако, подробный и систематический анализ воздействия частоты выдува, как и использование динамически адаптивного сигнала все еще отсутствует в литературе и требует дальнейшего исследования.

В недавней статье [2] исследовано влияние пульсирующей струи на характер течения в отрывной области за цилиндром, а также на величину лобового сопротивления поверхности цилиндра в зависимости от частоты и среднего импульса струи. Достигнуто уменьшение лобового сопротивления и изменение режима генерации срыва вихрей с поверхности цилиндра.

В настоящей работе эксперименты проведены на малогабаритной аэродинамической трубе, оборудованной PIV системой. Рабочий участок установки представляет собой прозрачную трубу прямоугольного сечения  $125 \times 125 \text{ мм}^2$ , длиной 1000 мм. Объект исследования выполнен в виде полого прозрачного

цилиндра с продольной щелью. К свободным концам цилиндра подключен скоростной клапан, позволяющий обеспечить частоту пульсирующей струи до 250 Гц. Подключенный к скоростному клапану компрессор позволяет получить перепад давления на клапане до 7 атм.

Для серии экспериментов выбран режим  $Re=10000$ , скорость набегающего потока 10 м/с. Собственная частота  $f=64 \text{ Гц}$ . На основании этого, для генерации струи выбраны кратные частоты – 32, 64, 128 Гц.

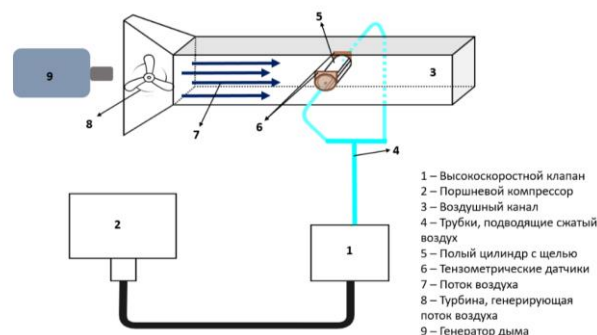


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

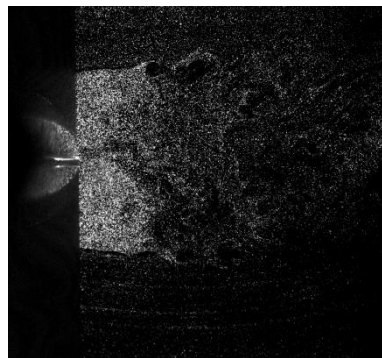


Рис. 2. Изображение зоны рециркуляции, засеянной глицериновой взвесью

### Список литературы:

1. Glezer A., Amitay M. Synthetic jets //Annual review of fluid mechanics. – 2002. – Т. 34. – №. 1. – С. 503-529.
2. Wu Z., Choi H. Modification of flow behind a circular cylinder by steady and time-periodic blowing //Physics of Fluids. – 2021. – Т. 33. – №. 11. – С. 115126.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 004.942+536.423.1

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПАРОВОГО ПУЗЫРЬКА НА ПЛОСКОЙ ТЕПЛОТДАЮЩЕЙ СТЕНКЕ С БЫСТРО РАСТУЩЕЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Левин А.А.<sup>1,2</sup>, Хан П.В.<sup>1,2</sup>, Сафаров А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

<sup>2</sup> Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Пузырьковое кипение широко используется в различного рода теплообменниках для интенсификации теплообменных процессов. Для построения теоретических моделей кипения крайне важна наработка массива данных о протекании микромасштабных процессов, связанных с образованием межфазной границы и ее эволюцией. В то же время, разнообразие изучаемых эффектов и условий протекания теплообменных процессов так велико, что получить надежные обобщенные аналитические зависимости в настоящий момент времени не представляется возможным.

Известен эффект увеличения критического теплового потока при нестационарном тепловыделении. При этом ограниченность современных теоретических представлений, способных предсказывать возникновение кризиса кипения в потоке недогретой жидкости [1] является основанием для углубленного изучения процесса кипения на металлической поверхности в условиях, когда достигаются высокие тепловые потоки. Как показывают многочисленные исследования [2,3] на сегодняшний день даже полуэмпирические подходы не способны в полной мере описать такие основополагающие характеристики процесса кипения как: температура жидкости в момент появления пузырька, количество формирующихся центров нуклеации на единицу поверхности/объема, время перехода от режима кипения, когда в жидкости образуются изолированные пузырьки к режиму, когда происходит их кластеризация, а также время перехода к предкризисному состоянию.

Обширное развитие средств численных реализаций математических моделей, а также расширение требований к детализации предсказательных моделей вызвали большой интерес к созданию новых подходов [4]. В данной работе представлена численная модель эволюции парового пузырька и расчетных значений скорости роста, тепловых потоков и максимального диаметра с ранее полученными экспериментальными данными [5].

Для создания математической модели используется ПО COMSOL Multiphysics. Рассматривается движение жидкости в трёхмерной расчётной области, с одной стороны ограниченной поверхностью нагревателя. На поверхности нагревателя скорость жидкости равна нулю, а температура задана, как функция от времени. Граничные условия на остальных сторонах об-

ласти определяют отсутствие внешних причин движения жидкости. Поверхность раздела жидкой и паровой фаз определяется с помощью вспомогательной функции на неподвижной сетке.

Движение смеси задано уравнением Навье-Стокса в ламинарном приближении. Уравнение теплопроводности учитывает перенос тепла за счет теплопроводности, конвекции и фазового перехода. Плотность, вязкость, теплопроводность 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 в правых частях уравнений

Расчеты выполнены в условиях [5] для верификации модели. Для сопоставления с двумерной осесимметричной моделью, рассмотрен случай нулевой скорости вынужденной конвекции. Давление равно 0.11 МПа. Начальная температура жидкости и поверхности нагревателя равны 30 °С. Рост температуры нагревателя принимает значения  $10^3$ - $10^4$  К/с.

Расчет роста паровой фазы начинался при достижении температуры  $T_{\text{об}}$ , как показано в [5]. При появлении, паровая фаза занимала область, представленную полусферой в центре поверхности нагревателя, с диаметром 0.01 мм.

По результатам моделирования были определены максимальный диаметр и время роста пузырька. Сравнение результатов трёхмерной, двумерной моделей и эксперимента при сопоставимых условиях показали совпадение в пределах 20%.

### Список литературы:

1. Минко М.В., Ягов В.В., Савкин С.С. Кризис кипения насыщенной воды в трубах при высоких давлениях // Теплоэнергетика. 2020. Vol. 6. P. 28–34.
2. Giustini G., Ardron K.H., Walker S.P. A semi-analytical model of bubble growth and detachment during nucleate boiling // Int. Heat Transf. Conf. 2018. Vol. 2018-Augus. P. 935–942.
3. Kim J., Kim M.H. On the departure behaviors of bubble at nucleate pool boiling // Int. J. Multiph. Flow. 2006. Vol. 32, № 10–11. P. 1269–1286.
4. 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. Vol. 6. P. 4848–4861.
5. Levin A.A., Khan P. V. Characteristics of nucleate boiling under conditions of pulsed heat release at the heater surface // Appl. Therm. Eng. 2019. Vol. 149. P. 1215–1222.

*Работа выполнена при поддержке РФФ  
проект №22-19-00092.*

УДК 621.9

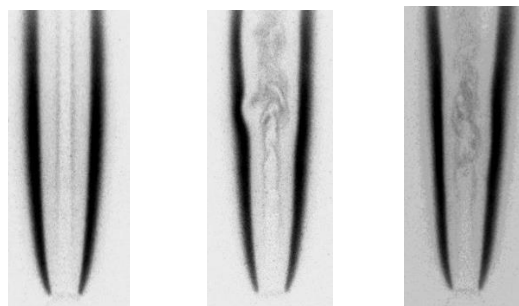
## ОН ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДИФфуЗИОННОГО ФАКЕЛА ПРОПАНА

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

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

В настоящее время одним из методов управления горением является воздействие вихревых структур на фронт пламени [1]. В работе проведено экспериментальное исследование взаимодействия крупномасштабных вихревых структур с фронтом пламени пропана ( $C_3H_8$ ) с помощью оптического метода PLIF. Факел пропана формировался при истечении топлива из кварцевой трубки диаметром  $d=3$  мм и длиной  $l=1$  м в воздух. Опыты проводились при числах Рейнольдса  $Re=1960-3650$ , когда внутри трубки происходил ламинарно-турбулентный переход. Как известно этот процесс осуществляется через механизм перемежаемости ламинарного и турбулентного участка течения. В результате на выходе из трубки формировались крупномасштабные турбулентные структуры (*puff*), которые были устойчивыми на начальном участке факела [2]. В кинетике горения пропана присутствуют радикалы ОН, которые являются индикатором газофазного механизма горения. Целью работы было изучение взаимодействия крупномасштабных структур с фронтом пламени  $C_3H_8$  методом PLIF с помощью диагностики ОН.

Измерительная PLIF система состояла из импульсного перестраиваемого лазера на красителях (Sirah Precision Scan), импульсного лазера накачки Nd:YAG (Quanta Ray) и чувствительной к ультрафиолетовому излучению усиленной камеры sCMOS. Лазерный луч был преобразован в лазерный нож с помощью коллиматора (LaVision). Перестраиваемый лазер на красителе возбуждал флуоресценцию ОН на длине волны перехода Q1(8). Выбор длины волны был обусловлен измерениями флуоресценции ОН, выполненными для той же экспериментальной установки в условиях реагирующего потока. Средняя энергия импульса при 283 нм составляла приблизительно 12 МДж. Чтобы учесть пространственную неравномерность распределения энергии в лазерном листе и изменение энергии каждого лазерного импульса, часть лазерного излучения (приблизительно 5%) была направлена в калибровочную кювету, содержащую родамин 6G. Пространственное распределение сигнала флуоресценции внутри кюветы регистрировалось с помощью ПЗС-камеры (IMPERX Bobcat IGV-B4820, 16 мегапикселей, 12 бит). Интенсивность сигнала флуоресценции ОН регистрировалась с помощью камеры sCMOS (LaVision Imager sCMOS, 16-битные изображения с разрешением  $2560 \times 2160$  пикселей), оснащенной УФ-чувствительным усилителем изображения (LaVision IRO). Усилитель изображения также был оснащен УФ-объективом и полосовым фильтром ( $310 \pm 10$  нм). Время экспозиции изображений PLIF составляло 200 нс.

Рис. 1. Интенсивность свечения ОН в факеле  $C_3H_8$ 

Эксперимент по взаимодействию крупномасштабных вихревых структур с фронтом пламени проводился при постоянном числе Рейнольдса  $Re=2523$ . Пример распределения интенсивности свечения радикала ОН показан на рис.1 в разные моменты времени (слева направо: ламинарная фаза факела, переходная и турбулентная). Локальный максимум интенсивности свечения радикала ОН при  $r/R=4$  соответствуют фронту пламени на внешней границе струи. Они характеризуют положение области химического реагирования в факеле пропана. Существенно меньший экстремум интенсивности свечения при  $r/R=1$  соответствуют ядру струи. Это свечение в приосевой области связано с излучением полиароматических углеводородов (ПАН- polycyclic aromatic hydrocarbons), которые являются промежуточным продуктом распада пропана, а не продуктом горения  $C_3H_8$  [2].

Свечение ПАН позволяет хорошо идентифицировать puff (вихревая структура, возникающая в процессе ламинарно- турбулентного перехода в трубке, через которую топливная смесь подается в воздух). Видно, что возмущения вносимые puff локализованы в границах образования ПАН, приводя к увеличению поверхности (а значит и скорости производства этих веществ) на которой образуются ПАН, что является важным фактором при образовании сажи.

## Список литературы:

1. Renard P.H., Thevenin D., Rolon J.C., Candel S. Dynamics of flame/vortex interactions // Prog. Eng. Combust. Sci. 2000. v.26. pp. 225–282.
2. Lemanov V., Lukashov V., Sharov K. Turbulent superstructures in inert jets and diffusion jet flames // Fluids. 2022. v. 6. Art. No. 459.
3. Shaddix C.R., Williams T.C., Blevins L.G., Schefer R.W. Flame structure of steady and pulsed sooting inverse jet diffusion flames // Proc. Combust. Inst. 2005. v.30. pp. 1501–1508.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121031800217-8.

УДК 004.94:533.6.01

## РАЗРАБОТКА СНЕГОЗАЩИТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ СНЕГОПЕРЕНОСА

Литвинцев К.Ю.<sup>1,2</sup>, Гаврилов А.А.<sup>1,2</sup>, Дектерев А.А.<sup>1,2</sup>, Дектерев Д.А.<sup>1,2</sup>, Захаринский Ю.Н.<sup>1</sup>,  
Мешкова В.Д.<sup>1</sup>, Минаков А.В.<sup>1</sup>, Филимонов С.А.<sup>1,2</sup>, Финников К.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79/10

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Красноярский филиал  
660036, Россия, Красноярск, Академгородок, 50/44

Значительная часть территории России расположена в области Крайнего Севера и на территориях, приравненных к нему. Развитие данных территорий имеет большой экономический потенциал. Однако, оно требует больших вложений из-за сложных климатических условий.

При развитии северной инфраструктуры необходимо решать множество проблем и одной из них, помимо низких температур и вечной мерзлоты, является формирование снежных заносов. Заметание снегом дорог, зданий и других объектов инфраструктуры приводит к существенному ухудшению уровня жизни населения и большим экономическим потерям. Мировой и российский опыт снегоборьбы с метелевыми заносами показывает, что более эффективной мерой является организация дополнительных снегозащитных мероприятий на основе: снегозащитных лесных полос, снегозадерживающих или снегопередувающих устройств [1, 2].

На текущий момент разработка снегозащитных мероприятий в России основывается на ведомственных строительных нормах 1976, 1987. Приведенные в них методики опираются на полуэмпирические модели, которые основаны на обобщенных данных, проводимых до 1980-ых годов исследований механизмов снегопереноса и методов снегоборьбы, и не позволяют полноценно учитывать локальный характер переноса снеговетрового потока [1]. Современные методы вычислительной гидродинамики и обработки цифровых данных уже позволяют более эффективно оценивать снегозащитные мероприятия для конкретных условий на этапе проектирования. В данной статье представлены результаты анализа снегозащитной системы для реального участка дороги на основе численного моделирования переноса снеговетрового потока с использованием эйлерова подхода для описания движения снежной взвеси, на основе авторских разработок в области численного моделирования процессов тепло-массопереноса в городской атмосфере [3].

В основе математической модели переноса снеговетрового потока лежат осредненные по Рейнольдсу нестационарные уравнения Навье—Стокса, диффузионно-инерционная модель движения малоинерционных частиц для моделирования переноса частиц снега. Для расчета осадения и уноса снега из слоя снежной взвеси используется предположение равновесности слоя сальтации при этом не учитывается накопление снега и, соответственно, деформация снежного покрова. Для описания турбулентных характеристик используется двухпараметрическая URANS  $k-\omega$  SST модель. Начальное и граничное распределение скорости, температуры и энергии турбулентных

пульсаций задаются по условию нейтральной атмосферы. Расчетная область, учитывающая рельеф и объекты инфраструктуры, строится на основе цифровой карты местности и открытых ГИС сервисов.

В ходе выполнения работы были проведены численные и физические исследования влияния геометрических параметров снегозадерживающих заборов на интенсивность осадения снега на начальном этапе формирования снежных отложений. Данные исследования показали, что основными геометрическими факторами, определяющими интенсивность осадения снега вблизи заборов, являются просветность (отношение общей площади панели/обрешетки забора к площади просветов в ней) и высота нижнего зазора (расстояние между землей и панелью забора) при сохранении общей высоты забора. В то же время геометрия самих панелей оказывает слабое влияние на интенсивность осадения снега.

Далее было проведено исследование, направленное на оценку эффективности расположения снегозадерживающих заборов, расположенных вдоль автомобильной дороги на участке с высоким уровнем снегоприноса. Оценка проводилась на основе анализа рельефа, естественных снежных отложений и влияния заборов на их перераспределение. Из-за больших размеров расчетной области (4,5×4,5 км по горизонтали) моделирование заборов осуществлялось в виде пористой среды.

Полученные результаты, показали, что использование комплексного компьютерного анализа, включающего в себя: численное и физическое моделирование переноса снеговетрового потока; обработку данных ГИС; инструменты визуального анализа, – позволяют более эффективно организовывать снегозащитные мероприятия по сравнению с используемыми, на данный момент, в России подходами.

### Список литературы:

1. Зимнее содержание автомобильных дорог / Г.В. Бялобжеский, А.К. Дюнин, Л.Н. Плакса, Л.М. Рудаков, Б.В. Уткин. М.: Изд-во Транспорт. 1983. 197 с.
2. Controlling blowing and drifting snow fences and road design / R.D. Tabler. Final Report for NCHRP. 2003. 307 p.
3. Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю., Филимонов С.А., Гаврилов А.А. Роль городской застройки в формировании "острова тепла" // Вычислительные технологии. 2021, Т. 26. № 5, С. 4–14

*Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (121031800229-1).*

УДК 536.248.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Литвинцева А.А.<sup>1</sup>, Вожаков И.С.<sup>1,2</sup>, Чеверда В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Тепловая трубка – это пассивный теплообменник без движущихся частей, работающий в широком диапазоне температур и тепловых потоков. Благодаря своим конструктивным преимуществам (гибкость, компактность), высокой теплопередаче и высокой эффективности без дополнительного потребления энергии, тепловые трубы нашли применение во многих областях, от охлаждения микроэлектроники до космических применений.

Тепловые трубы способны передавать большое количество тепла при незначительных перепадах температур по своей длине, преобразовывать тепловые потоки, создавать изотермические условия на относительно больших площадях, работать в условиях невесомости и в диапазоне температур от 4 до 3000 К с использованием подходящего хладагента. Тепловые трубки отличаются кажущейся простотой конструкции, малым весом, отсутствием движущихся частей и полной автономностью. Они не требуют затрат энергии на перекачку хладагента. [1]

Пульсационные тепловые трубы (ПТТ) очень простые в производстве (даже по сравнению с другими видами тепловых труб) и практически не содержат элементов, которые могут выйти из строя во время работы. Тепловые трубы являются одними из наиболее эффективных способов отвода тепла. [2, 3]

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию режимов работы пульсационной тепловой трубы. Экспериментальный стенд представляет собой ПТТ с одним витком для исследования гидродинамики и теплообмена двухфазного течения, рис. 1. Пульсационная тепловая трубка состоит из медной трубки внутренним диаметром 2 мм и толщиной стенки 1 мм. Общая длина медной трубки составляет 600 мм. Для визуализации процессов в тепловой трубе сделана вставка (2) из кварцевого стекла длиной 100 мм с внутренним диаметром также 2 мм и толщиной стенки 1 мм.

ПТТ откачивают безмасляным вакуумным насосом (9) до давления 500 Па, а затем заполняют дегазированной рабочей жидкостью с помощью шприца (7). С помощью термопар К-типа проводятся измерения температуры в испарителе, адиабатной зоне и в области конденсатора. Измерения осуществляются с помощью АЦП National Instruments NI9214. С помощью датчика давления Wika P-30 измеряется давление в ПТТ. Датчик подключён к компьютеру через АЦП National instruments USB-6001. Через теплообменник

на конденсаторе (30×30×20 мм) с помощью термостата Loip прокачивается жидкость при заданной температуре. Нагрев осуществляется при помощи нагревательного элемента длиной 50 мм и максимальной мощностью 200 Вт. Распределение температур вдоль ПТТ помимо термопар контролировалось с помощью ИК-сканера Titanium HD 570M.

Проведена серия экспериментов по исследованию теплообмена в тепловой трубе. Определены параметры ( $dT$  и  $P$ ), при которых запускается тепловая труба. Получены значения температуры в зоне нагревателя при запуске тепловой трубы.

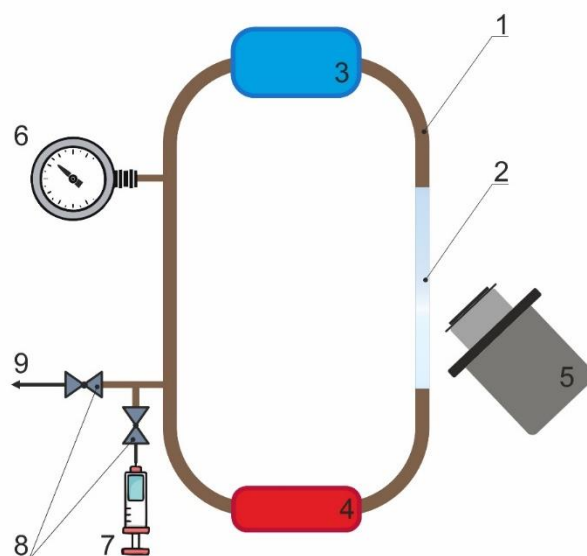


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

1 – пульсационная тепловая трубка, 2 – кварцевая трубка, 3 – теплообменник, 4 – нагреватель, 5 – фотоаппарат Nikon D7000 и ИК-сканера Titanium HD 570M, 6 – датчик давления, 7 – шприц с рабочей жидкостью, 8 – клапан, 9 – вакуумный насос.

### Список литературы:

1. Faghri, A., Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology // Journal of Heat Transfer, 2012, 134 (12).
2. Zhang Y.W., Faghri A., Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes // Heat Transfer Eng., 2008, 29 (1), pp. 20–44.
3. Xiao L, Cao Y. Recent advances in pulsating heat pipes and its derivatives // Journal of Enhance Heat Transfer, 2012, 19(3), pp. 213–231.

РНФ 20-79-10096 «Теоретическое и экспериментальное исследование пульсационных тепловых труб».



УДК 532.5, 532.6

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ КАПИЛЛЯРНО УДЕРЖАННЫЙ ВОЗДУХ, И КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ НА ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЙ В ТЕКСТУРИРОВАННОМ МИКРОКАНАЛЕ**Лобасов А.С.<sup>1,2</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,

660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Применение микрофлюидных систем, в частности, микрореакторов, позволяет значительно улучшить продуктивность и эффективность различных процессов при существенной миниатюризации приборов и аппаратов в физических, химических и биологических лабораториях. Контроль давления, температуры, времени реакции и скорости потоков в реакторах с небольшим объемом осуществляется намного проще и эффективнее. Выполнение функций в микрофлюидных системах и устройствах обеспечивается за счет локализации, течения, разделения, хранения микро- и нанокolicеств жидкости или газа, их физико-химических превращений под действием внешних электрических, магнитных, оптических, механических, тепловых и химических воздействий, а также малых поперечных размеров каналов микрофлюидных систем, что позволяет радикальным образом изменять соотношение силовых, энергетических и массовых потоков. Во многих случаях это смещение баланса потоков поддается управлению и может использоваться в целях многократной интенсификации процессов, для создания комбинации технологических условий, не достижимых в обычном оборудовании, а также для получения уникальных продуктов и материалов.

Однако в микроканалах, где поперечные размеры очень малы, то есть стенки расположены очень близко друг к другу, при выполнении условия прилипания скорость движения жидкости также очень мала. Увеличение скорости требует серьёзных затрат энергии, приложения значительных давлений, что может привести к разрушению канала. Кроме того, параболический профиль скорости ведет к значительному градиенту скорости вдоль продольной оси канала, что является причиной высоких значений гидравлических сопротивлений. Так, например, скорость течения воды в микроканале со средним гидравлическим диаметром 1 мкм при числе Рейнольдса, равном единице будет равно 0,1 м/с, а перепад давлений в канале такого поперечного размера и длиной 10 см составит около 31,58 атм. Соответственно, при увеличении числа Рейнольдса будут ещё более существенно возрастать скорости течения и перепады давлений в таком канале. Одним из возможных решений данной проблемы является использование явления скольжения на стенке, которое заключается в том, что в силу определенных поверхностных свойств скорость жидкости у стенок становится отличной от нуля. Такими поверхностными свойствами могут быть гидрофобность поверхности, наличие газа в полостях супергидрофобных текстур поверхности, поверхностный заряд, комбинация этих эффектов и пр. [1, 2]. Для гладкой однородной гидрофобной поверхности вводится такое понятие,

как длина скольжения – численный параметр, характеризующий скорость жидкости у стенки. Физический смысл длины скольжения – расстояние от твёрдой стенки, где скорость жидкости обращается в ноль. Кроме того, существуют ещё и супергидрофобные поверхности, которые имеют довольно сложный, отличный от плоскости, рельеф, и могут стабилизировать пузырьки газовой фазы внутри полостей этого рельефа. При использовании таких поверхностей жидкость фактически большую часть своего пути движется не по твердой поверхности, а по газовой фазе. На межфазной границе жидкость-газ трение очень мало, что приводит к резкому увеличению длины скольжения у таких поверхностей, как следствие, существенно снижается гидравлическое сопротивление такого канала. Обычно супергидрофобные поверхности создаются с использованием специальных методов текстурирования.

В работе проведено численное моделирование течения жидкости в канале с текстурированной стенкой, содержащей капиллярно удержанный воздух с использованием технологии градиентной адаптации расчетной сетки и VoF-метода. Было показано, что наличие газожидкостного скольжения снижает перепад давлений в текстурированном микроканале. Кроме того, исследование влияния различных краевых углов смачивания между жидкостью и воздухом показало, что зависимости перепада давления от краевого угла смачивания для различных чисел Рейнольдса имеют минимум при краевом угле смачивания, равном 90° для каждого Число Рейнольдса.

В расчетах также была получена еще одна значимая характеристика, а именно эффективная длина проскальзывания скорости на стенке. Установлено, что зависимость эффективной длины скольжения от числа Рейнольдса для различных краевых углов смачивания уменьшается с увеличением числа Рейнольдса. При этом, средняя эффективная длина скольжения при  $Re = 1$  равна 100 нм или 5% высоты микроканала.

## Список литературы:

1. Sharma H., Gaddam A., Agrawal A., Joshi S.S., Dimov S.S. Influence of texture shape and arrangement on thermo-hydraulic performance of the textured microchannels // International Journal of Thermal Sciences. 2020. V. 147. art № 106146
2. Myint M.T.Z., Hornyak G.L., Dutta J. One pot synthesis of opposing «rose petal» and «lotus leaf» superhydrophobic materials with zinc oxide nanorods // J. Colloid Interface Sci. 2014. V. 415. P. 32-38.

*Работа выполнена при поддержке гранта  
Российского научного фонда  
(проект № 20-79-00231).*

УДК 532.6, 532.61, 532.64

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖФАЗНОГО НАТЯЖЕНИЯ И КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ МЕЖДУ НЕФТЬЮ И НАНОСУСПЕНЗИЕЙ СИЛИКАЗОЛИ

Лобасов А.С.<sup>1,2</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup>, Пряжников М.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,

660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Нефтедобывающая отрасль является одной из основных в нефтегазовой индустрии и играет существенную роль в экономике не только Российской Федерации, но и многих зарубежных стран. Не вызывает сомнений тот факт, что повсеместно происходит постепенное истощение месторождений нефти, поэтому особенные актуальными становятся вопросы разработки и применения новых технологий нефтедобычи, позволяющих значительно увеличить нефтеотдачу уже разрабатываемых пластов, а также использовавшихся и законсервированных месторождений, на которых традиционными методами извлечь значительные остаточные запасы нефти уже невозможно.

Высоким потенциалом в области интенсификации нефтеотдачи обладают технологии применения наножидкостей в качестве вытесняющего агента [1–3]. Одной из основных причин проявления этого эффекта является изменение смачиваемости породы, способствующее вымыванию как пленочной, так и капиллярно-удержанной нефти.

В данной работе были проведены экспериментальные исследования межфазного натяжения и смачиваемости поверхности в системах: наноразмерная суспензия/нефть/горная порода, нефть/вода/горная порода. В экспериментах исследовалось влияние концентрации и размера наночастиц на коэффициент межфазного натяжения и значение краевого угла смачивания в этих системах.

Использовалась дистиллированная вода и образцы нефти «Vn» и «U». В качестве горной породы использовались пластинки песчаника, вырезанные из керна. Пористость и проницаемость керна составляла 22% и 250 мД. Кроме того, использовались наносуспензии силиказоли со средним размером наночастиц 10 нм, 15 нм и 20 нм, концентрация которых варьировалась в пределах от 0 до 2 мас.%.

Измерение межфазного натяжения и краевого угла смачивания проводилось с помощью автоматического тензиометра IFT-820-P. Принцип действия данного тензиометра основан на методе висячей (или сидячей) капли, при котором поверхностное натяжение определяется по результатам измерений параметров капли исследуемой жидкости и давления, а поскольку размеры постоянно меняются, то измерения и расчеты поверхностного натяжения осуществляются в режиме реального времени. Конструктивно тензиометр состоит из измерительного блока с оптической ячейкой, термостата, системы дозирования жидкости, системы управления давлением, интерфейса для внешнего компьютера, программного обеспечения DropImage

Advanced. Управление режимом измерения, процессом формирования капли, обработка результатов измерений осуществляется с помощью компьютера. Изображение капли, размеры, результаты расчетов выводятся на монитор. Ячейка IFT-820-P работает при величинах давления до 68.95 МПа и температуры до 176°C. Для наблюдения за формированием нефтяной капли и измерения параметров капли используется камера ramé-hart.

В результате проведенного исследования было установлено, что с увеличением концентрации наночастиц межфазное натяжение на границе нефть/наносуспензия снижается и при этом довольно значительно. Так, добавка 2 мас. % наночастиц снижает межфазное натяжение более чем в 2 раза. С уменьшением размера наночастиц этот эффект усиливается. Установлено, что добавка наночастиц значительно влияет на характеристики смачивания нефтью горной породы. С увеличением концентрации наночастиц в воде краевой угол для капли нефти возрастает, при этом тоже весьма существенно – с 115 до 155°. Таким образом, показано, что добавка наночастиц в жидкость ухудшает смачиваемость горной породы нефтью. Влияние добавки наночастиц на смачиваемость горной породы нефтью начинается уже при достаточно малых концентрациях наночастиц. Применение концентраций наночастиц выше 0,25 мас. % для модификации смачиваемости нецелесообразно. Исследование влияния размера наночастиц на смачиваемость поверхности нефтью в наносуспензии не выявило изменений. Таким образом можно сделать вывод, что использование наножидкостей позволяет модифицировать краевой угол смачивания, и, тем самым, даёт возможность управлять процессами извлечения нефти и повышать эффективность её добычи.

### Список литературы:

1. Wasan D., Nikolov A., Kondiparty K. The wetting and spreading of nanofluids on solids: Role of the structural disjoining pressure // Curr. Opin. Colloid Interface Sci., 2011, Vol. 16, Is. 4, P. 344–349.
2. Torsater O., Li S., Hendraningrat L. Enhancing oil recovery of low-permeability Berea sandstone through optimised nanofluids concentration // Society of Petroleum Engineers, 2013, art. No SPE-165283-MS.
3. Torsater O., Li S., Hendraningrat L. Effect of some parameters influencing enhanced oil recovery process using silica nanoparticles: An experimental investigation // Society of Petroleum Engineers, 2013, art. No SPE-165955-MS.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (номер FSRZ-2020-0012).*

УДК 531.3, 53.05, 532.5

КАВИТАЦИЯ ЗА ЦИЛИНДРОМ, РАСПОЛОЖЕННОМ В МИКРОКАНАЛЕ:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТЛобасов А.С.<sup>1,2</sup>, Скрипкин С.Г.<sup>2</sup>, Цой М.А.<sup>2</sup>, Кравцова А.Ю.<sup>2</sup><sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,

660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследования кавитации играют важную роль при решении широкого круга задач, связанных с высокоскоростным движением тел в жидкости [1], технологиями обработки материалов [2], а также с точки зрения получения фундаментальных знаний и развития представлений механики гетерогенных систем [3-5].

В данной работе рассматривается гидродинамическая кавитация, т.е. фазовый переход из жидкости в пар происходит в высокоскоростном потоке жидкости в локальной области – на цилиндре, расположенном в микроканале, – где давление падает ниже давления насыщенных паров. Течение жидкости в таких системах обычно соответствует турбулентному режиму. При этом основным недостатком микроканалов, а именно, очень высокое гидродинамическое сопротивление, в случае изучения кавитационных процессов становится их главным достоинством. Суть этого эффекта заключается в следующем: для появления кавитационных пузырьков необходимо как высокое давление в жидкости, так и его резкое падение до значения ниже давления насыщенных паров. В традиционных крупноразмерных установках это достигается за счёт использования высоконапорного оборудования, что требует существенных затрат. В микроканалах же как высокое давление на входе, так и резкое его падение реализуются автоматически просто за счёт их малых размеров.

Несмотря на обширный интерес к кавитационным процессам, систематических исследований возникновения и развития кавитации в микроканалах в широком диапазоне параметров практически нет. Поэтому в данной работе проведено расчётно-экспериментальное исследование процессов возникновения и развития кавитации на микроцилиндре, установленном в микроканале, в широком диапазоне значений давления жидкости на входе. Для моделирования кавитационных процессов использовалась модель кавитации Цварта-Гербера-Беламри (Zwart-Gerber-Belamri). Для моделирования турбулентности использовалась LES-модель. Экспериментальные исследования проводились в микроканальном кавитационном стенде методом визуализации с частотой съёмки 960 Гц. Микроканал с цилиндром был квадратного сечения с размером стенки 120 мкм. Тело цилиндрической формы имело радиус 80 мкм и высоту, совпадающую с высотой микроканала. Давление жидкости на входе в канал варьировалось в диапазоне от 2 бар до 30 бар.

В результате расчётов были получены зависимости от времени давления, скорости и объёмной доли пара в пяти точках, а также средние значения этих величин. Установлено, что устойчивая развитая кавитация существует для давлений на входе выше 18 бар, а для

давлений на входе меньше 8 бар кавитация не наблюдается вообще, что подтверждается экспериментальными исследованиями. Было обнаружено, что при появлении кавитационного процесса возникает перестройка как самого течения вокруг цилиндра, так и процесса вихреобразования.

Получены значения кавитационной пульсационной частоты (от 480 до 2200 Гц) и гидродинамической пульсационной частоты (от 26 до 96 кГц). Показано, что наличие кавитации смещает частоту гидродинамических пульсаций в область больших значений. Получена зависимость удельного гидродинамического сопротивления от давления на входе, которая хорошо аппроксимируется корреляцией вида:  $\zeta_r = (2\Delta p)^{0.5}$ .

Кроме того, было показано хорошее согласование результатов расчёта и эксперимента, в частности, по значениям давления входе в микроканала и на выходе из него. Зависимости этих величин от давления на входе в систему показаны на рис. 1.

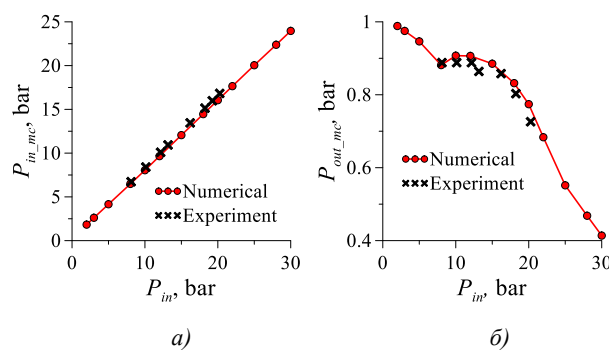


Рис. 1. Зависимости от давления на входе в систему:  
а) давления на входе в микроканал;  
б) давление на выходе из микроканала.

## Список литературы:

1. Федоров С.В., Велданов В.А. К определению размеров кавитационной полости в воде за движущимся с высокой скоростью цилиндрическим телом // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 2. С. 15–20.
2. Столяр С.В., Баюков О.А., Исхаков Р.С., Ярославцев Р.Н., Ладыгина В.П. Модификация магнитных свойств порошков  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в результате ультразвуковой обработки // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 24. С. 3–8.
3. Franc J.-P., Michel J.-M. Fundamentals of cavitation // Series on fluid mechanics and its applications. Ed. R. Moreau. Kluwer Academic Publ. 2004. V. 76. 321 p.
4. Волков Г.А., Петров Ю.В., Груздков А.А. Акустическая прочность воды, влияние ультразвука на фазовую диаграмму "жидкость-пар" // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 5. С. 123–126.
5. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н. Пульсации кавитационных вихревых колец в воде // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 22. С. 76–82.

Работа выполнена при поддержке гранта  
Российского научного фонда  
(проект № 19-79-10217).

УДК 536.52

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИК ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ****Лобода Е.Л.<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup> Томский государственный университет,  
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,  
634055, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1

Исследование процессов горения в настоящее время осуществляется при помощи разнообразных методов, активных, пассивных, оптических, контактных и т.д. Контактные методы исследования обладают рядом недостатков, связанных с внесением возмущений в зону горения, которые приводят к изменению структуры течения, нарушениям термодинамического равновесия, протеканиям химических реакций и пр. Методы PIV и PLIF [1, 2] позволяют с минимальными возмущениями в зоне горения производить визуализацию и измерения полей скорости и температуры в пламени. Эти методы хорошо применимы в стационарных процессах, а вот для исследования турбулентного и диффузионного пламени они не обладают достаточным быстродействием и сталкиваются с техническими ограничениями. В этой связи наиболее перспективными представляются оптические методы, которые лишены указанных недостатков. Например, существуют методы измерения характеристик пламени по его излучению в видимом диапазоне длин волн [3], тем не менее у такого метода есть свои ограничения технического характера и пределы применимости.

В последние десятилетия в науке и технике стали широко применяться методы ИК термографии при помощи которых решаются разнообразные задачи [4], связанные и дистанционным измерением температуры, активным неразрушающим контролем материалов, в том числе композиционных со сложной пространственной структурой. Методы ИК термографии активно применяются и в народном хозяйстве для диагностики энергосистем, анализа энергоэффективности, поиска теплонагруженных участков различных механозмов, двигателей и электронных систем. Как правило, применение методов ИК термографии ограничивается объектами, которые являются твердыми или жидкими средами, которые можно отнести к категории серых тел.

Пламя и газы, в том числе ионизированные, являются селективно излучающими телами, чей спектр излучения существенно отличается от спектра излучения абсолютно черного тела (по излучению которого калибруются все ИК камеры). Это вызывает перед исследователем ряд трудностей и фундаментальных проблем. В последнее десятилетие, в силу появления на рынке большого разнообразия ИК камер, исследователи стали чаще применять методы ИК термографии для исследований, в том числе и процессов горения. Следует отметить, что чрезвычайно высокая цена ИК камер «научного класса» делает их недоступными для большинства научных коллективов. Применение

ИК камер более низкого класса позволяет лишь на качественном уровне исследовать процессы, протекающие в пламени, что связано как со спектральным рабочим диапазоном, так и с быстродействием камер.

В докладе представлен опыт применения методов ИК термографии для исследования процессов горения в средневолновом ИК диапазоне длин волн с применением узкополосных оптических фильтров. Приводится анализ спектров излучения ряда пламен и обоснованный выбор спектральных интервалов для решения ряда задач, связанных с регистрацией поля температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем объектов.

На примере диффузионного горения приводятся результаты экспериментальных исследований турбулентных структур и оригинальная методика для оценки масштабов турбулентности в пламени на основе анализов последовательностей мгновенных ИК изображений пламени и спектров изменения температуры.

В докладе сформулированы основные требования к ИК технике, принципы и подходы для исследования процессов горения с применением методов ИК термографии. Представлен оригинальный подход для оценки масштабов турбулентности по доминирующим частотам в спектре изменения температуры в диффузионном пламени. На основе сравнения данных, полученных при помощи ИК термографии, анализа трассерных PIV изображений и математического моделирования показано взаимное соответствие между турбулентными структурами в полях термодинамических и гидродинамических параметров. На основе анализа термограмм, спектров пульсации температуры в пламени и масштабов турбулентности, представлен подход для критериальной оценки режимов течения на различных участках пламени.

**Список литературы:**

1. Markovich D.M., Dulin V.M., Abdurakipov S.S., Kozinkin L., Tokarev M.P. and Hanjalić K. Helical modes in low- and high-swirl jets measured by tomographic PIV, *Journal of Turbulence*, 2016, V. 17, Iss. 7, P. 678–698.
2. Z.S. Li, B. Li, Z.W. Sun, X.S. Bai, M. Alden, Turbulence and combustion interaction: High resolution local flame front structure visualization using simultaneous single-shot PLIF imaging of CH, OH, and CH<sub>2</sub>O in piloted premixed jet flame // *Combustion and Flame* 157 (2010), p. 1087-1096.
3. Самсонов В.П. Новые методы экспериментальных исследований гидродинамики и тепломассообмена в химически реагирующих средах. Ханты-Мансийск : Полиграфист, 2008. – 89 с.
4. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.

УДК 536.52

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА АТМОСФЕРУ

Лобода Е.Л.<sup>1,2</sup>, Лобода Ю.А.<sup>1,2</sup>, Касымов Д.П.<sup>1,2</sup>, Агафонцев М.В.<sup>1,2</sup>, Рейно В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет,  
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,  
634055, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1

Проблема природных пожаров в настоящее время остро стоит во всем мире, в том числе и в Западной Сибири на лесных и лесостепных территориях. Известно, что к их возникновению приводят не только природные факторы (грозы, сухие грозы), но и хозяйственная деятельность человека, зачастую сопровождающаяся беспечностью и безответственным поведением в отношении окружающей среды. Для России проблема природных пожаров характерна не только для Западной Сибири, но и для Европейской части России, Забайкалья, Дальнего Востока.

Томский государственный университет совместно с Институтом оптики атмосферы СО РАН проводит многолетние исследования пожаров в различных условиях, в том числе и в условиях, приближенных к натурным, на полигоне [1–6]. В результате этих исследований накоплен значительный опыт и знания как по организации и проведению таких исследований, так и по получению данных о характеристиках фронта природного пожара, его возникновению и распространению, влиянию пожара на метеопараметры, характеристики турбулентности в атмосфере, выбросах и переносе продуктов горения. В данной работе представлена часть экспериментальных данных о влиянии природных пожаров на характеристики атмосферы [1–4, 6].

Эксперименты проводились на территории Базового экспериментального комплекса Института оптики атмосферы СО РАН. Для моделирования возникновения верхового пожара был смоделирован полог леса из сосен высотой до 4 м, а также подрост из маленьких деревьев и кустарника (рис. 1). Экспериментальные образцы были заготовлены при рубках ухода в лесничестве Томской области и имели естественное влагосодержание (влагосодержание хвои составило на момент проведения эксперимента 114%). Возникновение верхового пожара моделировалось как в результате воздействия низового пожара, так и в результате воздействия потока горящих частиц, который формировался генератором горящих и тлеющих частиц [7].



Рис. 1. Изображение верхового пожара на модельном пологе леса.

Характеристики фронта горения (структура пламени, температура и оценка масштабов турбулентности) контролировались с применением ИК камеры JADE J530SB, а параметры атмосферы регистрировались с помощью трех ультразвуковых метеостанций АМК-03, которые размещались на разном удалении от фронта горения и на разных высотах. Аэрозольные составляющие продуктов горения и их перенос в атмосфере контролировался датчиками PMS 7003, расположенными стационарно по направлению ветра на разном расстоянии от фронта горения (до 250 м). Общее количество датчиков составляло 10 шт. Один датчик размещался на БПЛА, с его помощью контролировался аэрозольный состав продуктов горения на высоте 20 м на расстоянии от очага горения до 300 м.

В результате проведения экспериментов определены характерные масштабы турбулентности в пламени, установлено изменение флуктуаций показателя преломления, скорости звука и температуры в окрестности проведения эксперимента, которые являются отражением возникновения турбулентных процессов в атмосфере, получены экспериментальные данные о механизме возникновения верхового лесного пожара.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10068).

### Список литературы:

1. Grishin A.M., Filkov A.I., Loboda E.L., Reyno V.V., Kozlov A.V., Kuznetsov V.T., Kasymov D.P., Andreyuk S.M., Ivanov A.I., Stolyarchuk N.D. A field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition // International Journal of Wildland Fire. 23(3). P. 445-449. doi: 10.1071/WF12069.
2. Лобода Е.Л., Касымов Д.П., Агафонцев М.В. и др. Влияние малых природных пожаров на характеристики атмосферы вблизи очага горения // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 10. С. 818–823.
3. Гришин А.М., Фильков, А.И., Лобода Е.Л., Кузнецов В.Т., Рейно В.В., Руди Ю.А. Физическое моделирование степных пожаров в натуральных условиях // Пожарная безопасность. 2010. № 2. С. 100–105.
4. Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л., Рейно В.В., Руди Ю.А., Кузнецов В.Т., Караваев В.В. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в натуральных условиях // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 2. С. 91–102.
5. Гришин А.М., Голованов А.Н., Лобода Е.Л., Фильков А.И., Якимов А.С. Физическое и математическое моделирование возникновения и распространения торфяных пожаров. Томск: Изд-во Том. Ун-та. 2012. 124 с.
6. Loboda E.L., Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Reyno V.V., Gordееv Ye., Tarakanova V.A., Martynov P.S., Loboda Yu.A., Orlov K.E., Savin K., Dutov A. Effect of Small-Scale Wildfires on the Air Parameters near the Burning Centers // Atmosphere. 2021, 12, 75
7. Касымов Д.П., Перминов В.В., Фильков А.И., Агафонцев М.В., Рейно В.В., Лобода Е.Л. Патент № 199698 от 15.09.2020, Российская Федерация, Генератор горящих и тлеющих частиц для плоховентилируемых помещений.

УДК 621.9

**ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА НАНОЧАСТИЦ НА ТЕРМОГРАВИТАЦИОННУЮ КОНВЕКЦИЮ ПСЕВДОПЛАСТИЧНОЙ НАНОЖИДКОСТИ В ПОЛОСТИ С ТЕПЛОПРОВОДНОЙ ПОДЛОЖКОЙ И ИСТОЧНИКОМ ПЕРЕМЕННОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ**

Лоенко Д.С., Шеремет М.А.

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

Каждая система, в том числе механическая, электрическая, химическая и т.д., требует охлаждения тепловыделяющих элементов для увеличения производительности. Существует много элементов различной геометрии, например, транзисторы, резисторы, центральные или графические процессоры, которые в результате функционирования выделяют большое количество энергии, что требует организации эффективных систем охлаждения для отвода выделившегося тепла. Одним из дешевых и практичных способов охлаждения систем является использование режимов естественной конвекции. Реализация данного режима обусловлена формированием подъемной силы в поле действия силы тяжести вследствие изменения плотности рабочей среды. С целью интенсификации теплообмена возможно применение суспензии традиционного теплоносителя (вода, масло, этиленгликоль) и наночастиц высокотеплопроводных материалов. Например, многочисленные исследования показали, что добавление наночастиц в базовую жидкость улучшает ее теплофизические свойства, в том числе теплопроводность, электропроводность, теплоемкость. Сегодня наночастицы используются для доставки лекарств, хранения энергии, улавливания монооксида углерода, производства водорода, создания тканей, систем охлаждения и обогрева.

Поскольку каждый вид наночастиц имеет разные теплофизические свойства, данная работа посвящена исследованию влияния материала наночастиц на естественно-конвективный теплоперенос псевдопластичной наножидкости в квадратной замкнутой полости. На нижней стенке полости расположена теплопроводная медная подложка толщины  $h$ . На подложке расположен локальный источник переменного тепловыделения  $Q(t)$ . Внешние границы нижней стенки и верхняя стенка являются адиабатическими. Вертикальные стенки поддерживаются при постоянной низкой температуре  $T_c$ . Область решения представлена на рисунке 1. В качестве рабочей среды использовалась смесь карбоксиметилцеллюлозы с водой и различными наночастицами:  $Al_2O_3$ ,  $Cu$ ,  $CuO$ ,  $TiO_2$ . Для описания псевдопластичного характера течения жидкости применялся степенной закон Оствальда-де-Вилля.

Математическая постановка задачи включает в себя уравнения переноса массы, импульса и энергии для рабочей среды, а также уравнения теплопроводности для источника и подложки в преобразованных переменных «функция тока – завихренность» (1)-(5). Описанная нестационарная задача с соответствующими начальными и граничными условиями решалась на основе метода конечных разностей. Для решения был создан вычислительный код, верификация которого проведена с использованием численных данных других авторов.

В результате моделирования было оценено влияние материала наночастиц, объемной доли наночастиц, числа Рэлея, толщины подложки и относительной частоты колебаний теплового потока в источнике на распределение изолиний функции тока и температуры, отражающие внутреннюю гидродинамику и тепловое состояние объекта исследования. Отдельно рассмотрено влияние определяющих параметров на интенсивность теплосъема с поверхности источника энергии, а также на его среднюю температуру.

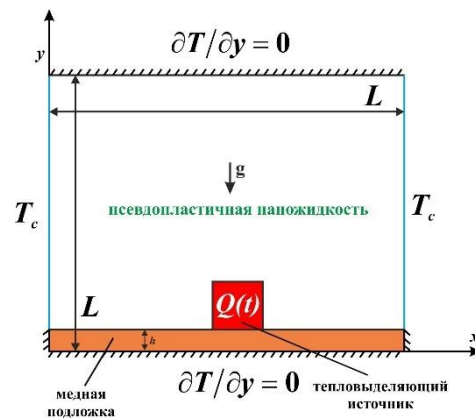


Рисунок 1. Область решения.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega \tag{1}$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \tag{2}$$

$$= H_1(\phi) \left( \frac{Ra}{Pr} \right)^{\frac{n-2}{2}} \left[ \nabla^2 (\bar{M}\Omega) + S_\Omega \right] + H_2(\phi) \frac{\partial \Theta}{\partial X}$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Theta}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \tag{3}$$

$$= \frac{H_3(\phi)}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \left[ \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{bf}} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial Y} \right) \right]$$

$$\frac{\partial \Theta_{hs}}{\partial \tau} = \frac{\alpha_{hs}}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \left( \frac{\partial^2 \Theta_{hs}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{hs}}{\partial Y^2} + \frac{1}{2} [1 - \sin(f\tau)] \right) \tag{4}$$

$$\frac{\partial \Theta_w}{\partial \tau} = \frac{\alpha_w}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \left( \frac{\partial^2 \Theta_w}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_w}{\partial Y^2} \right) \tag{5}$$

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

УДК 621.45.034

## ГАЗОТУРБИННЫЙ СТРУЙНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Локотко А.В.

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

Предложена концепция газотурбинного струйного двигателя (ГТСД). Цель разработки - повышение термического КПД двигателя за счет повышения температуры рабочего тела (РТ). Двигатель представляет собой устройство типа Сегнера колеса с вращающейся камерой сгорания и тангенциально установленными соплами. Истекающие из сопел струи создают вращающий момент. Полное расширение РТ происходит в системе роторов, коаксиально установленных относительно камеры сгорания и также оснащенных реактивными соплами. Охлаждение камеры сгорания (КС) и сопел осуществляется жидкометаллическим теплоносителем (сплав натрия + калий). Он циркулирует под действием центробежных сил со сбросом тепла к входящему воздуху. В этом случае охлаждение корпуса КС и сопел достигается значительно проще, чем охлаждение лопаток турбины в известных устройствах. Передача тепла от теплоносителя к поступающему воздуху осуществляется после последней ступени компрессора, обеспечивая тем самым рекуперацию тепла. Внутренние перегородки между камерами осуществляются через звуковые (нерасширяющиеся) сопла.

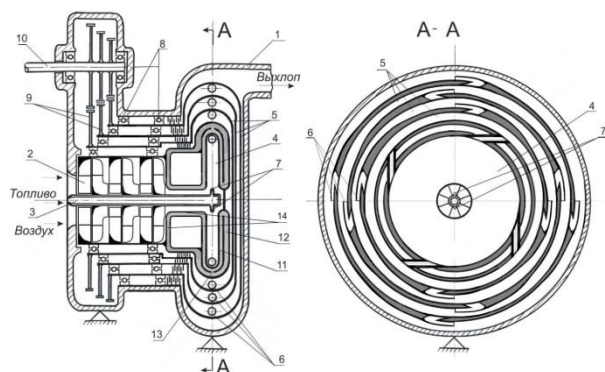


Рис. 1. Схема газотурбинного струйного двигателя.

1 – кожух; 2 – компрессор осевой; 3 – топливопровод;  
4 – вращающаяся камера сгорания; 5 – камеры дожигания;  
6 – сопла тяговые; 7 – сопла - смесители; 8 – подшипники;  
9 – редуктор; 10 – вал отбора мощности; 11 – «горячая»  
камера сгорания; 12 – рубашка охлаждения камеры  
сгорания; 13 – сопла; 14 – участок встречи входящего  
воздуха с горячим теплоносителем.

Газотурбинные двигатели (ГТД) обладают рядом преимуществ перед поршневыми двигателями. Они имеют более высокую удельную мощность, благоприятное для транспортных средств изменение крутящего момента, т.е. лучший коэффициент приспособляемости, полное расширение рабочего тела, увеличенный в

2-3 раза ресурс за счет балансировки и минимизации трущихся поверхностей, меньший расход смазочных жидкостей, низкие требования к качеству топлива вне зависимости от октанового числа, меньшее время подготовки к пуску, особенно при низких температурах. Между тем, ГТД уступают поршневым двигателям по экономичности. Это определяется недостаточным высоким тепловым КПД - отношением полезной работы к затраченному теплу - из-за ограничения температуры на входе в турбину из-за недостаточной жаростойкости лопаток турбины. Снижение температуры газов до допустимых пределов в известных ГТД достигается за счет подачи большого количества воздуха, значительно превышающего необходимое для сгорания топлива при стехиометрическом соотношении [3]. Дополнительная мощность тратится на прокачку лишнего воздуха. Повышение допустимой рабочей температуры в ряде случаев достигается повышением жаростойкости лопаток турбин, например, применением термобарьерных покрытий на основе керамики и (или) внутреннего охлаждения лопаток. Лучшие зарубежные ГТД имеют температуру газа на входе в турбину 1500°C с перспективой увеличения до 1700°C [3], но эти значения значительно ниже температуры горения стехиометрических смесей углеводородных топлив с воздухом, равной ~2100°C [3]. Расчетные оценки показывают, что ГТСД обеспечивает достижение поставленной цели – повышение теплового КПД. На расчетном режиме КПД=0,47, удельный расход топлива 0,26 кг/кВтч, что сравнимо с соответствующими показателями для дизелей. Двигатель остро настроен на оптимальный режим работы, поэтому его использование, по-видимому, наиболее целесообразно в условиях постоянной нагрузки, например, для привода генераторов в системах распределенной электрогенерации, на гибридных автомобилях — для зарядки аккумуляторов, или на маломерных судах в качестве главного двигателя. Двигатель, по-видимому, должен обладать улучшенными экологическими свойствами в смысле снижения шума при работе за счет полного расширения рабочего тела на выхлопе (в отличие от поршневых ДВС).

## Список литературы:

1. Patent RU No. 2441998 of the Russian Federation, MKI C1. Gas turbine jet engine / A.V. Lokotko (RF) N 2010136606/06; Appl. 31.08.2010; Publ. 02/10/2012, Bul. No.
2. Deutsche Patentanmeldung Nr. 20 2012 102 965.0 – IPG F23R 3/42, Bezeichnung Gasturbinenstrahl Gebrauchsmusterinhaber Lokotko, Anatolij V., RU, Tag der Anmeldung 07.08.2012, Tag der Eintragung 04.09.2012. Публ.: <http://depatisnet.dpma.de>
3. Р.М. Яблоник. Газотурбинные установки. Москва.: Машгиз, 1959, 408 стр.

УДК 621.9

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН ПРИ ОТРАЖЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ПРОФИЛИРОВАННОГО ТОРЦА КАНАЛА****Лопато А.И.**Институт автоматизации проектирования РАН,  
123056, Россия, Москва, 2-ая Брестская ул., 19/18

Проблемы газовой детонации в химически реагирующих смесях важны как с точки зрения прикладной науки – при разработке перспективных детонационных двигателей, разработке мер предотвращения пожаров и взрывов в шахтах и штольнях, – так и с точки зрения фундаментальной науки, включая вопросы инициирования и особенности распространения детонационных волн (см., например, ссылки в [1]). Иницирование детонационной волны (ДВ) может осуществляться различными способами. Инициаторами могут выступать такие объекты, как электрическая искра, лазерная искра, взрывающаяся проволока и т.д. В качестве инициатора можно использовать так называемые “горячие точки” – области течения повышенного давления и температуры. Формирование таких точек может происходить, как в проходящем потоке – за счет криволинейных стенок, третьих тел в области, – так и путем отражения потока от профилированных торцов канала.

В работе [2] инициирование ДВ происходит за счет отражения ударной волны (УВ) от профилированного торца в форме набора эллиптических и плоских участков поверхности. УВ формируется в ударной трубе, разделенной мембраной. Будем называть такую УВ основной. Труба заполнена водородно-кислородной смесью. При отражении ударной волны происходит инициирование детонации. Целью работы является математическое моделирование инициирования детонационной волны в каналах с профилированным торцом.

Математическая модель основана на системе двумерной системе уравнений Эйлера, дополненной моделью кинетики химических реакций. Рассматривается глобальная модель кинетики горения и детальная модель кинетики Petersen-Hanson [3]. Параметры в покоящейся смеси (фоновые параметры) следующие: Перед фронтом УВ давление 0.04 атм, температура 295 К.

Численные расчеты проводятся с использованием метода конечных объемов. Одной из ключевых особенностей вычислительного алгоритма является использование треугольных расчетных сеток, которым покрывается расчетная область. Осуществляется процедура расщепления по физическим процессам. При переходе с одного временного слоя на другой сначала рассматриваются уравнения газодинамики без учета химической кинетики. Затем рассчитанные значения подставляются в качестве начальных данных в уравнения без конвективных членов, но с химической кинетикой. Таким образом, на первом этапе определяется вклад конвекции, а на втором этапе – химических реакций.

На этапе учета конвекции численные значения потоков через грани треугольных ячеек рассчитываются

с использованием схемы AUSM. Для повышения порядка аппроксимации по координатам значения по обеим сторонам от граней определяются с использованием реконструкций сеточных функций и ограничителя minmod. Интегрирование по времени проводится с использованием метода Рунге-Кутты второго порядка. Более подробно особенности вычислительного алгоритма представлены, например, в [4, 5].

Численные исследования проводятся для геометрии торца, состоящей из двух эллиптических участков, разделенных плоским участком стенки длины 10 мм. Диаметры эллипса 10 мм и  $10 \cdot \sqrt{2}/2$  мм, что соответствует геометриям эллипсов из физических экспериментов. Расчеты показывают, что время инициирования детонации коррелирует с результатами физических экспериментов. При числах Маха основной УВ порядка 2.4 инициирование ДВ не наблюдается за время численных экспериментов. Для числа Маха 2.5 наблюдается слабое инициирование детонационной волны. Иницированию способствует многочисленное взаимодействие волн горения и ударных волн, формируемых при отражении основной УВ от торца. Для большего числа Маха 2.6 и детальной кинетики время инициирования уменьшается (28 мкс), но инициирование также происходит по механизму, близкому к слабому. Расчеты с таким же числом Маха в случае глобальной кинетики дает меньшее время инициирования (20 мкс). Кроме того, инициирование происходит по механизму, близкому к сильному инициированию. Иницирование происходит у каждого эллиптического участка независимо, без интерференции волн соседних участков.

## Список литературы:

1. A.I. Lopato. Some aspects on pulsating detonation wave numerical simulation using detailed chemical kinetics mechanism // Applied Mathematics and Computational Mechanics for Smart Applications. Proceedings of AMMAI 2020. 2021. V. 217. P. 103 – 114.
2. A.A. Vasil'ev. Cellular structures of a multifront detonation wave and initiation (Review) // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2015. V. 51 P. 1-20.
3. E.L.Petersen, R.K. Hanson. Reduced kinetics mechanisms for RAM accelerator combustion // Journal of Propulsion and Power. 1999. V. 15. N 4. P. 591-600.
4. A.I. Lopato, P.S. Utkin, A.A. Vasil'ev. Mechanisms of detonation initiation in multi-focusing systems // Shock Waves. 2020. V. 30. N. 4. P. 741 – 753.
5. A.I. Lopato, A.G. Eremenko, P.S. Utkin, D.A. Gavrilov. Numerical simulation of detonation initiation: the quest of grid resolution // Advances in Theory and Practice of Computational Mechanics. Proceedings of the 21st International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems. Eds.: Jain, L.C., Nikitin, I.S., Favorskaya, M.N., Reviznikov, D.L. Part of the Smart Innovation, Systems and Technologies book series. V. 173. P. 79 – 89.

*Работа выполнена в рамках гос. Задания ИАП РАН.*



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНОГО ПРИСТЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В КОНФУЗОРЕ И ДИФFUЗОРЕ

Лукьянов А.А.<sup>1,2</sup>, Зарипов Д.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Явление отрыва потока встречается в различных отраслях народного хозяйства, таких как авиастроение, ракетостроение, энергетика и медицина. Оно имеет важное практическое значение, поскольку его возникновение зачастую влияет на эффективность и надежность работы различных технических устройств. На сегодняшний день, явление отрыва потока, или обратного пристенного течения (ОПТ), возникающее в дозвуковых диффузорах, хорошо изучено и его существование не вызывает сомнений [1]. Возникновение таких явлений в безградиентном турбулентном пограничном слое (ТПС) долгое время считалось невозможным [2], из-за сложности его экспериментального исследования, связанной с низкой вероятностью их возникновения и малой пространственно-временной протяженностью отрывной области. Например, в среднем высота области ОПТ примерно в 5 раз меньше толщины вязкого подслоя [3] и может быть меньше колмогоровского масштаба длины [4]. Эти факторы демонстрируют нетривиальность экспериментального исследования явления ОПТ. Впервые экспериментально оно было обнаружено лишь в 2015 году [5]. Однако вопрос о его существовании при отрицательном продольном градиенте давления, например, в дозвуковом конфузоре, остается открытым и требует дальнейшего исследования.

Для этого в данной работе экспериментально (методом PIV) было рассмотрено турбулентное течение воздуха в канале длиной 6 м с различной геометрией. Канал состоял из предвключенного участка длиной 3600 мм с постоянным поперечным сечением ( $100 \times 100$  мм<sup>2</sup>), рабочего участка длиной 1200 мм с переменной площадью поперечного сечения и выходного участка. Входное сечение рабочего участка оставалось неизменным ( $100 \times 100$  мм<sup>2</sup>), а выходное – варьировалось:  $100 \times 120$ ,  $100 \times 100$ ,  $100 \times 80$  мм<sup>2</sup>.

Измерения были выполнены высокоскоростным панорамным методом PIV (Particle Image Velocimetry) с высоким пространственно-временным разрешением на уровне колмогоровского масштаба. Алгоритм обработки полученных PIV-изображений и метод фильтрации сигналов скорости по времени подробно описаны в работе [6]. Обработка PIV-изображений проводилась с использованием вытянутых в продольном направлении расчетных областей со сторонами  $64 \times 8$  пикс без перекрытия, что позволило снизить неопределенность измерения и повысить пространственное разрешение.

Результаты предварительных измерений профилей средней продольной скорости и турбулентных пульсаций скорости поперек канала показали, что течение на входе в рабочий участок было турбулентным, развитым и без закрутки. Анализ мгновенных и условно

осредненных сигналов скорости впервые показал существование явления локального мгновенного отрыва потока в конфузоре с выходным сечением  $100 \times 80$  мм<sup>2</sup>. На рис. 1 представлены условно осредненные сигналы продольной составляющей вектора скорости  $\langle u \rangle^+$  в вязком подслое ( $y^+ = 0,3$ ) для диффузора и конфузора, а также приведено их сравнение с данными, полученными в работе [4] для прямого канала. Сходство между этими сигналами указывает на то, что механизм возникновения ОПТ в конфузоре такой же, как при турбулентном течении в канале постоянного поперечного сечения [4].

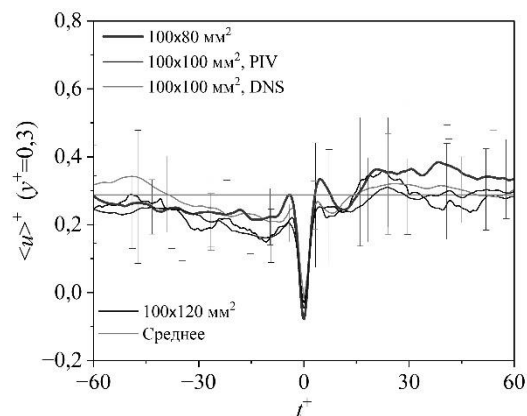


Рис.1. Условно осредненные сигналы по времени продольной составляющей вектора скорости на расстоянии  $y^+ = 0,3$  от стенки для конфузора, диффузора и канала постоянного поперечного сечения.

### Список литературы

1. Чжен К. Пауль. Отрывные течения // Перевод с английского докт. техн. наук. А.И. Голубинского. Под ред. Г.И. Майкапара. МИР. М. 1972-1973. В 3-х томах.
2. Eckelmann H. The structure of the viscous sublayer and the adjacent wall region in a turbulent channel flow // J. Fluid Mech. 1974. Vol. 65, № 3. P. 439–459.
3. Cardesa J.I. et al. The structure and dynamics of backflow in turbulent channels // J. Fluid Mech. 2019. Vol. 880. P. R3.
4. Zaripov D., Ivashchenko V., Mullyadzhyanov R., Li R., Mikheev N., Kähler Ch.J. On a mechanism of near-wall reverse flow formation in a turbulent duct flow // J. Fluid Mech. 2021. Vol. 923, Art. A20.15 p.
5. Brücker Ch. Evidence of rare backflow and skin-friction critical points in near-wall turbulence using micropillar imaging // Phys. Fluids. 2015. Vol. 27, № 3, Art. 031705. 7 p.
6. Zaripov D.I., Li R., Dushin N.S. Dissipation rate estimation in the turbulent boundary layer using high-speed planar Particle Image Velocimetry // Experiments in Fluids. 2019. Vol. 60, № 1. 16 p.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-29-01274)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТАЦИОНАРНОГО СНАРЯДА ТЕЙЛОРА

Лукиянов Ан.А.<sup>1,2</sup>, Алексеев М.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Двухфазные режимы течения в каналах (снарядный, пузырьковый, дисперсно-кольцевой, кольцевой) встречается в большом числе современных технологических и промышленных устройств. Например, в ядерных и химических реакторах, в теплообменниках, в большинстве устройств, используемых в нефтегазовой сфере. Снарядный режим течения характеризуется наличием в потоке газовых пузырей, по форме напоминающих «снаряд», в литературе часто называемых снарядом или пузырем Тейлора.

В экспериментальных работах по исследованию Тейлоровского снаряда в вертикальной трубе было показано, что одиночный газовый снаряд всплывает со скоростью  $U = 0,35\sqrt{gD}$ . Скорость всплытия не зависит от длины пузыря. В опускном потоке жидкости, скорость которого равна скорости всплытия снаряда, возникает режим, в котором жидкость обтекает неподвижный снаряд [1].

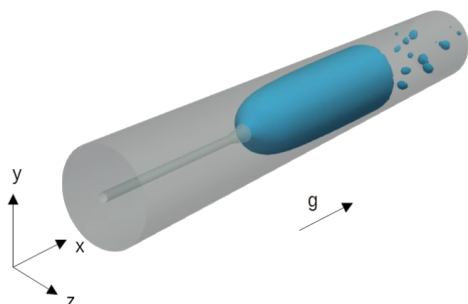


Рис. 1. Трехмерная поверхность пузыря для опускного потока жидкости 0.18 м/с

Данная экспериментальная задача является одной из классических верификационных задач для CFD кодов [2]. В связи с этим возникла цель научной работы – численное моделирование гидродинамики потока вокруг стационарного снаряда с использованием открытой платформы для решения задач механики сплошных сред – OpenFOAM.

Геометрия расчётной области и граничные условия для численного моделирования определялись из экспериментальной работы [1] (рис. 1). 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 неизотермических несмешивающихся жидкостей с использованием метода VOF. Расчетная сетка была выполнена в форме круглого канала длиной 150 мм и диаметром 20 мм со сгущением около стенки. Общее количество ячеек в расчетной области составляло около 3 миллионов.

Уравнения Навье-Стокса дополнялись уравнениями модели турбулентности k- $\omega$  SST.

На рисунке 2 показано сравнение форм пузырей, полученных с помощью численного моделирования и эксперимента. Трехмерная поверхность построена по объёмной доле жидкости для длин снарядов 26 мм и 70 мм при опускном потоке жидкости 0.15 м/с.

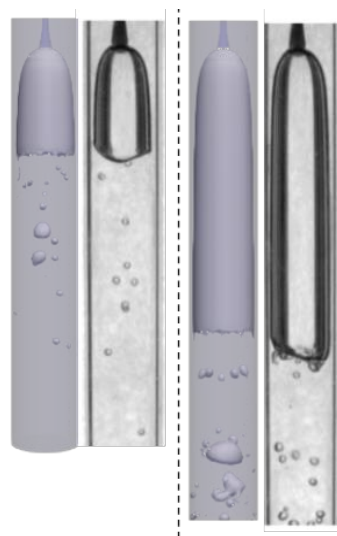


Рис. 2. Сравнение форм пузырей, полученных численно и экспериментально [1] для опускного потока жидкости 0.15 м/с

В работе был проведён расчет межфазной поверхности квазистационарного снаряда Тейлора. Получены профили трения на стенке для различных длин снарядов и для различной скорости опускного потока жидкости вдоль всего канала. Было показано, что форма снаряда пузыря хорошо совпадает с экспериментом.

### Список литературы:

1. Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д., Трение на стенке при обтекании стационарного газового снаряда опускным потоком жидкости // Теплофизика и аэромеханика, 2008, том 15, № 1, С. 93–98.
2. Гузей Д.В., Минаков А.В., Пряжников М.И., Дектерев А.А. Численное моделирование газожидкостных потоков в мини- и микроканалах // Теплофизика и аэромеханика, 2015, том 22, № 1, С. 61–72.

*Расчеты выполнены на кластере Информационно-вычислительного центра Новосибирского государственного университета.*

*Работа поддержана государственным контрактом Российской Федерации с Институтом Теплофизики СО РАН (121032200034-4).*

УДК 621.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПЛАМЕНИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИК-ТЕРМОГРАФИИ

Луценко А.В.<sup>1,2</sup>, Лобода Е.Л.<sup>1,2</sup>, Агафонцев М.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Томский Государственный Университет,  
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,  
634055, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1

Диффузионный режим горения имеет место как в природных, так и в технологических процессах. Процесс перемешивания окислителя с газообразными летучими компонентами топлива всегда сопровождается турбулентностью.

Несмотря на большие успехи и объем проделанной работы в теории турбулентного пламени многие вопросы пока остаются нерешенными. Наличие турбулентности почти всегда приводит к увеличению скорости горения. Это увеличение связано с механизмом взаимодействия турбулентных пульсаций с волной горения. Практически во всех тепловых или других энергетических установках течение в камерах сгорания является турбулентным.

Турбулентные потоки характеризуются непрерывными флуктуациями скорости, которые могут приводить к флуктуациям скалярных параметров потока.

Исследования пламени и турбулентного пламени, в частности, связано с рядом трудностей, заключающихся в том, что контактные методы измерений оказывают влияние на гидродинамические и термодинамические характеристики пламени, нарушая его форму, структуру и баланс энергии. Исследование различными оптическими методами в видимом диапазоне длин волн дает, как правило, качественные результаты, а применение PIV и PLIF имеет существенное ограничение в скорости регистрации. Такие подходы приемлемы при изучении стационарных процессов, но в случае диффузионного горения они не позволяют получить удовлетворительные результаты.

Отдельно следует рассмотреть применение методов ИК-термографии. При измерении температуры они позволяют отказаться от применения большого числа термопар и при этом получить приемлемое пространственное разрешение с высокой детализацией по времени. Благодаря этому возможно исследование полей температуры в пламени без внесения возмущений в него, а также возможна визуализация температурных неоднородностей. Следует отметить, что применением методов ИК-термографии для исследования процессов горения связано с рядом фундаментальных трудностей, которые обусловлены селективной излучательной способностью пламени [1].

В работе представлены результаты экспериментальных исследований диффузионного пламени, образующегося при горении ряда топлив и природных горючих материалов в лабораторных и полунатурных условиях. С применением подхода [2] даны оценки масштабов турбулентности в пламени. Установлено, что в лабораторных условиях на термограмме (рис. 1а) четко идентифицировались как крупномасштабные

структуры, так и структуры с существенно меньшими размерами, а в спектре изменения температуры (рис. 2а) присутствовали пульсации с частотами до 8 Гц (соответствующие масштабы турбулентности 15-49 мм). Анализ термограмм и спектров изменения температуры в пламени, показал, что в полигонных условиях (рис. 1б, 2б) в пламени доминируют крупномасштабные турбулентные структуры с соответствующими частотами пульсации температуры до 1.5 Гц (соответствующие масштабы турбулентности 38-72 мм).

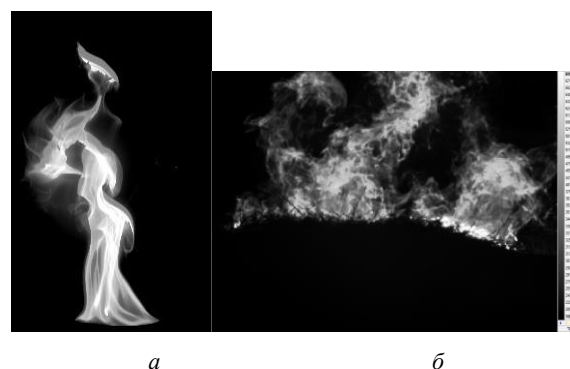


Рис. 1. Термограмма фронта горения растительных горючих материалов в лабораторных условиях (а) и в полунатурных условиях (б).

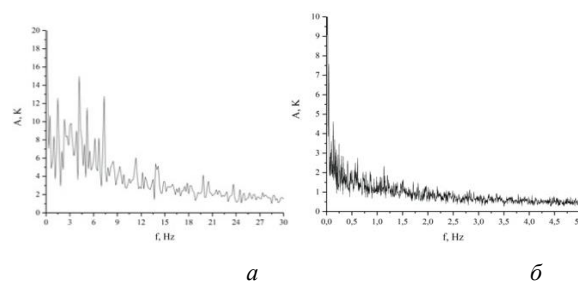


Рис. 2. Спектры изменения температуры в пламени

### Список литературы:

1. Применение термографии при исследовании процессов горения / Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В. Изд-во Том. ун-та, 2016. 80 с.
2. Loboda E.L., Matvienko O.V., Agafontsev M.V., Reyno V.V., Vavilov V.P. IR thermography study of flow structure and parameters in diffusion flames // *Infrared Physics & Technology*. V. 117 (2021) 103851.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10068).*

УДК 536.2

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В КУБИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ПОРИСТЫХ РЕБЕР

Ль С.Х.К.<sup>1</sup>, Шеремет М.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

<sup>2</sup>Томский государственный университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36

**Введение.** Реберная структура имеет широкое практическое применение в промышленности благодаря простоте и надежности конструкции. Ребра могут быть твердыми или пористыми. Пористые ребра за счет своей конечной проницаемости более эффективно интенсифицируют теплообмен, чем твердые структуры. Многие опубликованные статьи ориентированы на изучение реберной структуры в двумерной постановке. Так, Khanafer и др. [1] численно исследовали ламинарный свободно-конвективный теплообмен в квадратной полости с тонким пористым ребром на горячей стенке при различных параметрах. Результаты исследования показали, что наличие пористого ребра увеличивает среднее число Нуссельта по сравнению с полостью без ребер. Asl и др. [2] исследовали режимы естественной конвекции внутри дифференциально-обогреваемой наклонной полости с несколькими пористыми ребрами на горячей стенке. Результаты анализа показали, что с использованием нескольких пористых ребер, наблюдается увеличение среднего числа Нуссельта в полости до 41% по сравнению с областью с твердыми ребрами и до 20% по сравнению с областью без ребер. В данной работе изучается влияние пористых ребер на интенсификацию теплообмена внутри замкнутого дифференциально-обогреваемого куба.

**Физико-математическая постановка задачи.** Область решения представляет собой кубическую полость размера  $L$  с твердыми непроницаемыми стенками. Две противоположные вертикальные грани имеют постоянные температуры  $T_h$  (при  $y = 0$ ) и  $T_c$  (при  $y = L$ ), причем  $T_h > T_c$ . Другие грани являются теплоизолированными. Сила тяжести направлена вертикально вниз вдоль оси  $z$ . На нагретой стенке устанавливаются одинаковые, равномерно расположенные пористые ребра длины  $l$ , которая варьируется в диапазоне от  $0.1L$  до  $0.5L$ . Ширина ребер зафиксированы и совпадает с размером стороны кубической полости, а толщина ребер равна  $h = 0.1L$ .

Дифференциальные уравнения, описывающие процесс нестационарного конвективного теплопереноса в приближении Буссинеска в безразмерных преобразованных переменных «скорость – вектор завихренности», имеют следующий вид:

– внутри воздушной полости:

$$\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \tau} + (\bar{V}, \bar{\nabla}) \bar{\omega} = (\bar{\omega}, \bar{\nabla}) \bar{V} + \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \bar{\omega} + \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \bar{i} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \bar{j} \right),$$

$$\nabla^2 \bar{V} = -\text{rot}(\bar{\omega}),$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + (\bar{V}, \bar{\nabla}) \theta = \frac{1}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \nabla^2 \theta,$$

– внутри пористых ребер:

$$\varepsilon \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \tau} + (\bar{V}, \bar{\nabla}) \bar{\omega} = (\bar{\omega}, \bar{\nabla}) \bar{V} + \varepsilon \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \nabla^2 \bar{\omega} - \frac{\varepsilon^2}{Da} \sqrt{\frac{Pr}{Ra}} \bar{\omega} + \varepsilon^2 \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \bar{i} - \frac{\partial \theta}{\partial x} \bar{j} \right),$$

$$\nabla^2 \bar{V} = -\text{rot}(\bar{\omega}),$$

$$\eta \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + (\bar{V}, \bar{\nabla}) \theta = \frac{a_{fin} / a_{air}}{\sqrt{Ra \cdot Pr}} \nabla^2 \theta.$$

Безразмерные начальные и граничные условия для системы дифференциальных уравнений имеют вид:  $\tau = 0 \rightarrow u = v = w = \omega_x = \omega_y = \omega_z = 0, \theta = 0,5$ ,

при  $\tau > 0$  имеем

– на твердых стенках  $x = \text{const}$ :

$$u = v = w = 0, \omega_x = 0, \omega_y = -\frac{\partial w}{\partial x}, \omega_z = \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$$

– на твердой стенке  $y = 0$ :

$$u = v = w = 0, \omega_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \omega_y = 0, \omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y}, \theta = 1$$

– на твердой стенке  $y = 1$ :

$$u = v = w = 0, \omega_x = \frac{\partial w}{\partial y}, \omega_y = 0, \omega_z = -\frac{\partial u}{\partial y}, \theta = 0$$

– на твердых стенках  $z = \text{const}$ :

$$u = v = w = 0, \omega_x = -\frac{\partial v}{\partial z}, \omega_y = \frac{\partial u}{\partial z}, \omega_z = 0, \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$$

Система дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями решалась методом конечных разностей. Разработанный алгоритм решения был протестирован на модельных задачах в сравнении с экспериментальными и численными данными других авторов.

**Результаты.** Численные исследования проведены в широком диапазоне изменения определяющих параметров. Полученные результаты показывают, что введение пористых ребер приводит к улучшению теплообмена в полости по сравнению с полостью без ребер и полостью с твердыми ребрами.

Список литературы:

1. Khanafer K., AlAmiri A., Bull J. Laminar natural convection heat transfer in a differentially heated cavity with a thin porous fin attached to the hot wall // Int. J. Heat Mass Transf. 2015. Т. 87. С. 59–70.
2. Asl A.K., Hossainpour S., Rashidi M.M., Sheremet M.A., Yang Z. Comprehensive investigation of solid and porous fins influence on natural convection in an inclined rectangular enclosure // Int. J. Heat Mass Transf. 2018. Т. 133. С.729-744.

*Работа выполнена при поддержке  
Программы развития Томского политехнического  
университета (Приоритет-2030).*

УДК 536.1

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСКИПАНИЯ ЖИДКОСТИ В ВОЛНЕ РАЗРЕЖЕНИЯ****Майоров В.О.<sup>1</sup>, Ястребов А.К.<sup>2</sup>, Левашов В.Ю.<sup>1</sup>**<sup>1</sup> НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова  
119192, Россия, Москва, Мичуринский проспект, 1<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
11250, Россия, Москва, Красноказарменная, 14

При внезапном падении давления значительно ниже давления насыщения, жидкость переходит в существенно неустойчивое метастабильное состояние. В этом случае образуется большое число микроскопических паровых пузырей, то есть реализуется объемный фазовый переход жидкость-пар. Такое явление может происходить, например, в случае внезапной разгерметизации сосуда с криогенной жидкостью. В этом случае в уровень жидкости быстро поднимается, что может приводить к высокоскоростному истечению ее из сосуда. Помимо разрушительного характера, объемное вскипание имеет ряд технических приложений. Истечение жидкого топлива в область с пониженным давлением также сопровождается интенсивным вскипанием жидкости, что в свою очередь сильно влияет на характеристики струи и эффективность перемешивания топлива с окислителем в камере сгорания силовой установки. Это обстоятельство позволяет создавать эффективные системы охлаждения, используемые в космосе [1].

В настоящей работе рассматривается одномерная задача об эволюции газодинамического разрыва, слева от которого находится жидкость под высоким давлением, а справа – пар с низким давлением. В такой постановке в левую сторону распространяется волна разрежения, в которой давление и температура жидкости падают, при этом давление насыщения падает быстрее, таким образом жидкость становится перегретой и в ее объеме начинается фазовый переход. Для описания процессов используются подходы механики сплошной среды и физической кинетики. Газодинамическая часть описывается системой уравнений для невязкой и нетеплопроводной среды, состоящей из уравнений сохранения массы, импульса и энергии для каждой фазы, и уравнения эволюции объемной доли паровой фазы [2]. Эта система дополняется двухчленным уравнением состояния для каждой фазы, коэффициенты которого рассчитываются по алгоритму, предложенному в [3] для интересующего температурного интервала. Для описания кинетики вскипания жидкости применяется кинетическое уравнение для функции распределения паровых пузырей по размерам [4], которое описывает эволюцию функции распределения вследствие конвективного переноса пузырей, их роста и образования новых пузырей, коагуляция пузырей не рассматривается. Этот подход обусловлен тем, что в рассматриваемой области одновременно может находиться большое число пузырей с разными размерами. Функция распределения позволяет определить интегральные характеристики двухфазной среды, а также вычислить источники, входящие в систему уравнений газовой динамики. Критический радиус и скорость нуклеации вычисляются со-

гласно классической теории нуклеации [5]. Рост паровых пузырей в следствие испарения жидкости на межфазной границе не учитывается, поскольку рассматриваемый временной интервал достаточно мал.

Для решения задачи предлагается алгоритм, основанный на методе расщепления, то есть на каждом временном слое сначала рассчитывается газодинамическая часть без источников, а затем решается система обычно вентных дифференциальных уравнений описывающая изменение параметров за счет фазового перехода. Для расчета газодинамической части используется метод Годунова с приближенным методом решения задачи Римана HLLC, а для решения кинетического уравнения – метод, предложенный в [6].

В работе предложен алгоритм для численного моделирования вскипания жидкости в волне разрежения. Проведены расчеты для воды и додекана с учетом фазового перехода и без него. Полученные результаты хорошо согласуются с точным решением без учета фазового перехода. Также была получена зависимость скорости распространения волны кипения в додекане от начальных условий, полученные результаты удовлетворительно согласуют с экспериментальными данными [7].

**Список литературы:**

1. Wang, J.-X., Li, Y.-Z., Zhang, H.-S., Wang, S.-N., Mao, Y.-F., Zhang, Y.-N., & Liang, Y.-H. Investigation of a spray cooling system with two nozzles for space application // *Applied Thermal Engineering*, 2015. V. 89, P. 115–124.
2. Saurel, R., Abgrall, R. A Multiphase Godunov Method for Compressible Multifluid and Multiphase Flows // *Journal of Computational Physics*. 1999. V. 150(2), P. 425–467.
3. Le Métayer, O., Massoni, J., & Saurel, R. Élaboration des lois d'état d'un liquide et de sa vapeur pour les modèles d'écoulements diphasiques // *International Journal of Thermal Sciences*. 2004. V. 43(3). P. 265–276.
4. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах / Л.Е. Стернин. - М.: Машиностроение, 1974. - 212 с.
5. Метастабильная жидкость / В.П. Скрипов М.: Наука, 1992, 312 с.
6. Корценштейн Н. М., Самуйлов Е. В., Ястребов А. К. Новый метод моделирования объемной конденсации пересыщенного пара // *ТВТ*. 2009. Т. 47. № 1. С. 89–100
7. Simões-Moreira J.R., Shepherd J.E. Evaporation waves in superheated dodecane. *J. Fluid Mech* // 1999. V. 382. P. 63–86

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского Фонда Фундаментальных Исследований  
(грант № 20-38-90042).*

УДК 662.62:662.75:662.94.069

## ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПЫЛЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ ПИРОГЕНЕТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Мальцев Л.И.<sup>1</sup>, Гвоздяков Д.В.<sup>2</sup>, Зенков А.В.<sup>2</sup>, Калтаев А.Ж.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Томский политехнический университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Водоугольные суспензии (ВУС) являются перспективными топливами для промышленной энергетики [1]. С точки зрения экономики, в качестве компонентов ВУС можно использовать отходы угольнообогатительных фабрик, отработанные нефтепродукты (ОН), сточные воды, жидкие отходы химических производств. Такой широкий спектр компонент позволяет производить недорогую энергию в сравнении с традиционными топливами – уголь, газ, мазут. Еще одним преимуществом водоугольных топлив (ВУТ) являются низкие, в сравнении с углем, объемы эмиссии в атмосферу продуктов сгорания [2]. Такие положительные качества перспективных топлив промышленной энергетики являются основанием для их всестороннего изучения.

Несмотря на широкий спектр исследованных жидких компонентов ВУС, современными учеными не изучено влияние пирогенетической жидкости (ПЖ) на свойства и характеристики суспензий. Это вещество является отходом пиролизных процессов, в частности, при производстве древесного угля. Последний достаточно широко используется в качестве топлива для котлов малой и средней мощности. Древесный уголь как правило изготавливают из отходов лесоперерабатывающего комплекса. Образующаяся в процессе пиролиза древесины, ПЖ содержит в себе различные соединения фенолов и кислот, поэтому ее прямая утилизация в систему канализации запрещена. При этом жидкость обладает калорийностью (1–4 МДж/кг). Этот показатель, как правило, зависит от технологических условий процесса пиролиза. Одним из вариантов ее утилизации является сжигание путем подмешивания к жидким топливам, например, ВУТ.

Исследованный состав ВУС подвергался обработке в роторном гидродинамическом генераторе кавитации (ГК). При работе данного генератора на твердые частицы суспензии воздействуют сразу три механизма измельчения: ударный; истирание; кавитационный [3].

Отсутствие в литературе данных о влиянии ПЖ на свойства и характеристики ВУС аргументирует актуальность проведения соответствующих исследований. Таким образом, целью работы является обоснование эффективности кавитационной обработки водоугольных суспензий с добавлением пирогенетической жидкости по результатам экспериментальных исследований реологических свойств и характеристик распыления таких топлив.

В качестве дополнительного компонента ВУТ использовалась пирогенетическая жидкость со следую-

щими характеристиками: плотность – 1044,0 кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость – 2,21 сП, кинематическая вязкость – 2,12 мм<sup>2</sup>/с, pH – 2,31.

Исследован состав ВУС с замещением 20% по массе воды пирогенетической жидкостью. Также подготовлен образец ВУТ для сравнения, не прошедший подготовку в генераторе кавитации. Отбор проб из ГК производился после 90 и 300 секунд кавитационной обработки.

Исследованные параметры:

- динамическая вязкость – вискозиметр Реотест-2;
- плотность – расчетный метод;
- седиментационная устойчивость – расслоение в мерном стакане;
- средний размер капель после распыления – метод IPI (Interferometric Particle Imaging).

Ниже представлены результаты экспериментов по определению влияния длительности кавитационной обработки на динамическую вязкость суспензии (см. рис. 1).

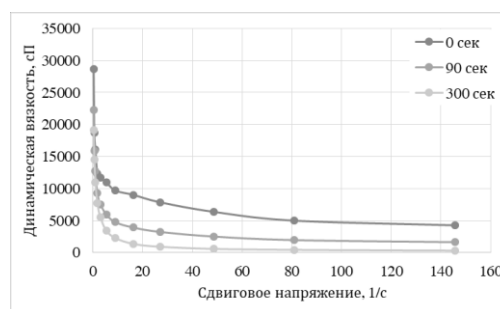


Рис. 1. Влияние длительности кавитационной обработки на вязкость ВУТ с добавлением ПЖ.

Установлено, что даже довольно короткое (до 90 сек) воздействие кавитационной обработки приводит к снижению вязкости ВУТ с добавлением пирогенетической жидкости. Увеличение времени нахождения образца в ГК до 300 сек влечет за собой дальнейшее уменьшение динамической вязкости относительно образца сравнения.

### Список литературы:

1. Саламатин А.Г. О состоянии и перспективах использования водоугольного топлива в России // Уголь. 2000. Т. 3. С. 10–15.
2. Zhou H., Li Y., Li N., et al. Conversions of fuel-N to NO and N<sub>2</sub>O during devolatilization and char combustion stages of a single coal particle under oxy-fuel fluidized bed conditions // Journal of the Energy Institute. 2019. Vol. 92. pp. 351–363.
3. Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Кравченко И.В. и др. Обзор работ по приготовлению водоугольного топлива и его сжиганию в котлах // Горение и плазмохимия. 2021. Т. 19. С. 265–277.

УДК 621.9

## КОНДЕНСАТОР ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Марчук И.В.<sup>1,2</sup>, Бараховская Э.В.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

<sup>3</sup> Université libre de Bruxelles, 1050, Бельгия, Брюссель, Avenue F.D. Roosevelt 50

Необходимость поддержания стабильного энерго-снабжения при дефиците топлива и сырья, тенденции, направленные на миниатюризацию устройств, требуют повышенного внимания отраслей к задачам ресурсо- и энергоэффективности. В аэрокосмической и автомобильной отраслях эффективность промышленного оборудования часто зависит от интенсивности процессов теплопередачи с фазовыми переходами. Остается актуальным спрос на высокопроизводительные конденсаторы, как на элемент испарительно-конденсационных систем, для улучшения теплопередачи и повышения эффективности устройств.

Отдельное внимание уделяется поиску эффективных решений для обеспечения контроля двухфазных систем в космических установках. Экспериментальные исследования активно осуществляется в рамках программы Enhanced Condensers in Microgravity (ENCOM), направленной на углубление понимания гидродинамики стекающих пленок внутри вертикальной трубы, внутритрубной конденсации и пленочной конденсации на криволинейной поверхности. Пленочная конденсация пара в условиях микрогравитации рассматривается в работах [1–4]. Отсутствие постоянной гравитации изменяет подход к решению задач, так как баланс сил в двухфазных системах кардинально меняется. На первый план выходят малоизученные эффекты (поверхностные и термокапиллярные), необходима также дополнительная адаптация систем отвода конденсата.

В данной работе экспериментально и численно исследуется процесс пленочной конденсации пара в условиях микрогравитации. Предложена и протестирована специальная поверхность конденсатора, стабилизирующая поток конденсата и интенсифицирующая процесс в условиях микрогравитации [5] (рис. 1а). Отдельное внимание посвящено организации эксперимента для получения точных локальных данных (распределения толщины пленки и температурное поле внутри конденсатора). Найденные решения использованы для подготовки эксперимента на МКС.

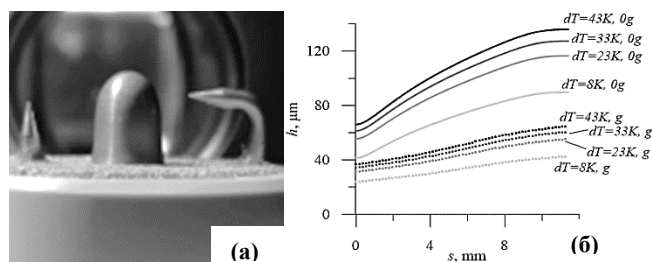


Рис.1 (а) – изготовленное ребро (б) – результаты численного моделирования: распределение толщины пленки.

Для получения точных локальных распределений толщины конденсата и температурного поля

внутри конденсатора была создана экспериментальная установка (рис. 2) [4, 6]. Отдельное внимание уделено созданию системы отвода конденсата, концепция которой сочетает в себе способность криволинейной поверхности перемещать жидкость и комбинацию пористой среды и насоса в качестве активной системы отвода конденсата с охлаждаемой поверхностью в микрогравитации [7].

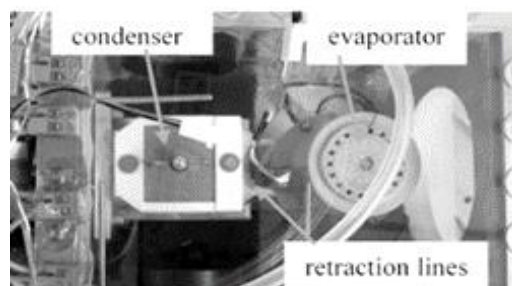


Рис.2 Вид сверху на экспериментальную ячейку.

Сочетание предложенной формы конденсатора, дизайна установки, проведения эксперимента на МКС, позволит отделить влияние фактора градиента капиллярного давления на процесс конденсации от всех остальных факторов. Таким образом станет возможным получить эталонные экспериментальные данные, которые составят полный набор локальных характеристик, создающих бэнчмарк для проверок теоретических гипотез и численных моделей.

### Список литературы:

1. Kabov O., Marchuk I., Rodionova D. Condensation on curvilinear fins (effect of groove flooding): EMERALD experiment of ESA // Microgravity Sci. Technol. 2007. 19(3–4), pp.121–124.
2. Marchuk I., Kabov O. Vapor condensation on curvilinear disk-shaped fin at microgravity // Microgravity Sci. Technol. 2008. 20(3–4), pp. 165–169.
3. Bortolin S., El Achkar G., Kostoglou M., Glushchuk A., Karapantsios T.D., Lavielle P., Del Col D., Buffone C., Miscovic M., Toth B., Minster O. Experimental Investigations on Condensation in the Framework of ENhanced COndensers in Microgravity (ENCOM-2) Project // Microgravity Sci. Technol. 2014. 26(5), pp. 335–349.
4. Glushchuk A., Minetti C., Machrafı H., Iorio C.S. Experimental investigation of force balance at vapour condensation on a cylindrical fin // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. 108, pp. 2130–2142.
5. Barakhovskaia E., Marchuk I. Fin shape design for stable filmwise vapor condensation in microgravity // Microgravity Sci. Technol. 2022. 34(1), 8.
6. Buffone C., Grishaev V., Glushchuk A. Experimental investigation of liquid retention in a cyclone evaporator under variable gravity conditions // Appl. Therm. Eng. 2016. 99, pp. 235–243.
7. Barakhovskaia E., Glushchuk A., Queeckers P., Iorio C.S. Stabilisation of condensate flow from curvilinear surfaces by means of porous media for space applications // Exp. Therm. Fluid Sci. 2021. 121, 110283.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН 121031800213-0, проектов Heat Transfer PRODEX, MAP Condensation project AO-2004-096.

УДК 536.7

## О ВЛИЯНИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАГЕНТОВ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Масленников Г.Е., Симанов Н.А., Никитин А.Д., Осипов П.В., Рыжков А.Ф.

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

В работе проводится численное исследование процессов теплообмена в печи термогравиметрического анализатора (ТГА) NETZSCH STA 449 F3, направленное на повышение точности определения кинетических характеристик образцов при их термических превращениях в разных средах. Штатные средства контроля дают опосредованные сведения, соответствующие удаленным от образца точкам замера. В результате может появиться заметная температурная и концентрационная разверка, формирующая вполне значимую систематическую концентрационную и температурную погрешность

Концентрационная разверка будет наиболее заметна в переходных режимах, возникающих при импульсном переключении газовых потоков. Соотношение между конвективным и диффузионным переносом характеризуется диффузионным числом Пекле (Pe<sub>d</sub>) [1]:

$$Pe_d = \frac{wL}{D},$$

где  $w$  – скорость движения газа, м/с;  $L$  – характерный размер (высота печи ТГА);  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

В рабочем диапазоне расходов и температур для ряда применяемых в ТГА сред по нашим оценкам Pe<sub>d</sub> изменяется от ~3–5 до ~50–90, что будет формировать разную динамику наполнения печи реагентом.

Температурная разверка наиболее заметна при протекании в образце химических реакций с ненулевым тепловым эффектом. Например, перегрев нижней поверхности держателя тигля с навеской горящих угольных частиц по сравнению с пустым тиглем  $\Delta T_{1-10} = (T_1 - T_{10})$  (см. рис. 1) в работе [2] достигал ~50°C. При этом р температур между образцом T<sub>3</sub> и нижней поверхностью держателя T<sub>1</sub> не контролируется, что негативно влияет на точность определения теплового эффекта реакции и константы скорости реагирования.

Если температурная погрешность сравнительно небольшая ( $\Delta T < 20^\circ\text{C}$ ), тогда погрешность в определении энергии активации зависит от температурной погрешности следующим образом:

$$\frac{\Delta E_a}{E_a} \approx \frac{\Delta T}{T}.$$

Валидация модели и прогностические оценки выполнены применительно к специально проведенным термогравиметрическим исследованиям конверсии ископаемого и возобновляемого углеродсодержащего сырья в последовательно протекающих процессах декарбонизации (горения) и карбонизации (минерализации зольного остатка).

Применение результатов выполненного исследования позволяет рассчитывать неконтролируемые прибором фактические концентрации реагента вблизи образца при импульсном переключении сред и фактические температуры образца при его термохимических преобразованиях.

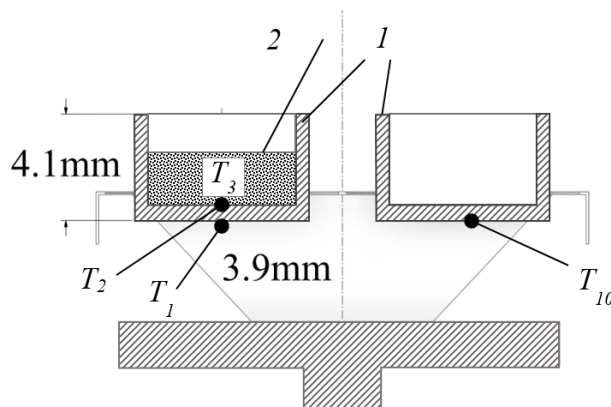


Рис. 1. Схема ДСК-держателя: 1 – тигли, 2 – образец.

В результате исследования установлено, что при импульсном переключении газовых сред время нарастания концентрации наиболее тяжелого газа (CO<sub>2</sub>) в области навески в рабочем диапазоне больше в 2-4 раза, чем время конвективного переноса  $\tau_k = L/w$ , что требует соответствующей коррекции программы обработки ТГА-эксперимента.

Наибольший неконтролируемый прибором локальный перегрев образцов получен при проведении экзотермического процесса окисления древесного угля и составил ~ 100 °С или 11,5% от контролируемого уровня термодары в печном пространстве. Учет перегрева повысит точность определения энергии активации реакции на 6-7%.

### Список литературы:

1. Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. М.: Высшая школа, 1963. 256 с.
2. Худякова Г.И., Амарская И.Б., Белоусов В.С. Влияние высоты навески топливных частиц при термогравиметрическом исследовании конверсии угля // Сб. материалов докл. IX междунар. семинара вузов по теплофизике и энергетике: в 4 т. Казань, 2015. Т. 1. С. 122-131

*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 536.6

**МОНОКРИСТАЛЛ ЦЕЗИЙ-ЛИТИЕВОГО МОЛИБДАТА: ЭНТАЛЬПИЯ РЕШЕТКИ, ТЕПЛОЕМКОСТЬ, КОРРЕЛЯЦИИ «ТЕРМОДИНАМИКА-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА»****Мацкевич Н.И.<sup>1</sup>, Семерикова А.Н.<sup>1</sup>, Самошкин Д.А.<sup>1,2</sup>, Станкус С.В.<sup>2</sup>, Трифонов В.А.<sup>1</sup>, Лукьянова С.А.<sup>1</sup>, Шлегель В.Н.<sup>1</sup>, Кузнецов В.А.<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630073, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Монокристаллы находят широкое применение во всех областях техники благодаря их устойчивости, однородности, возможности высокопрецизионной обработки поверхности и другим свойствам. Монокристаллы на основе молибдатов и вольфрамов металлов являются перспективными материалами для оптоэлектроники, микроэлектроники, оптической коммуникации, физики высоких энергий и др. областей [1, 2]. Одним из перспективных монокристаллов для перечисленных выше применений является цезий-литиевый молибдат ( $\text{CsLiMoO}_4$ ). В работах [1, 2] показано, что он обладает высоким оптическим коэффициентом, а также высоким потенциалом для поиска редких событий.

В настоящей работе впервые низко-градиентным методом Чохральского выращен монокристалл  $\text{CsLiMoO}_4$  и определены его термодинамические характеристики, отсутствующие в литературе: стандартная энтальпия образования, энтальпия решетки, энергия стабилизации, теплоемкость в интервале температур 319–1000 К. Кроме того, найдены корреляции между энтальпией решетки и длиной люминесценции в системе  $\text{Cs}_2\text{MoO}_4 - \text{Li}_2\text{MoO}_4$ .

В качестве прекурсоров для выращивания монокристалла  $\text{CsLiMoO}_4$  использовались глубоко очищенный  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (99.99%) и  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  (99.99%). Перед выращиванием монокристалла проводили твердофазный синтез. Тигель помещали в трехзонную печь сопротивления и нагревали до температуры 820 К со скоростью 30 К/ч. После этого температура была повышена на 5 К выше точки плавления и соединения выдерживали при этой температуре для гомогенизации расплава. Далее, монокристалл выращивали на монокристаллические затравки. Идентификацию  $\text{CsLiMoO}_4$  проводили рентгенофазовым анализом на диффрактометре Shimadzu XRD-7000,  $\text{CuK}\alpha$ -излучение, 1.54178 Å, Ni-фильтр, интервал 10–110 градусов. Было установлено, что кристалл имеет кубическую структуру, пространственная группа  $F-43m$ , параметр решетки  $a=8.3220$  (2) Å.

Для определения стандартной энтальпии образования использовали метод калориметрии раствора [3]. Термохимический цикл был построен таким образом, что энтальпия растворения монокристалла  $\text{CsLiMoO}_4$  в 0.4 М КОН сравнивалась с энтальпией растворения карбоната лития, оксида молибдена и иона  $\text{Cs}^+$ . На основе полученных экспериментальных и литературных данных была рассчитана стандартная энтальпия образования  $\text{CsLiMoO}_4$ :  $\Delta_f H^0 = -1526.8 \pm 5.2$  кДж/моль. Далее, с использованием

цикла Борна-Габера была рассчитана энтальпия решетки:  $\Delta_{lat} H^0 = -28750$  кДж/моль. Рассчитанная энергия стабилизации составляла:  $\Delta_f H^0 = -309.6 \pm 5.4$  кДж/моль.

Для определения теплоемкости в интервале температур 319–1000 К был использован метод дифференциально-сканирующей калориметрии [3]. Измерения осуществлялись на установке 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). Перед проведением каждого термического цикла рабочий объем установки откачивался до вакуума 1 Па и несколько раз промывался аргоном, чистота которого составляла 99.992 об. %. В качестве калибровочного образца использовался сапфир. Теплоемкость монокристалла  $\text{CsLiMoO}_4$  в интервале температур 319–1000 К меняется плавно, что свидетельствует об отсутствии фазовых переходов. С использованием программного обеспечения Origin была проведена аппроксимация полученных данных по теплоемкости монокристалла  $\text{CsLiMoO}_4$ . Температурная кривая теплоемкости  $\text{CsLiMoO}_4$  хорошо описывается кубическим уравнением:  $C_p = 93.66471 + 0.17798T - 1.30846 \cdot 10^{-4}T^2 + 4.53803 \cdot 10^{-8}T^3$  (Дж/(К моль)).

Рассмотрение данных по энтальпиям решетки и длине люминесценции соединений в системе  $\text{Cs}_2\text{MoO}_4 - \text{Li}_2\text{MoO}_4$  показало, что с увеличением энтальпии решетки длина люминесценции увеличивается в ряду соединений:  $\text{Cs}_2\text{MoO}_4 - \text{CsLiMoO}_4 - \text{Li}_2\text{MoO}_4$ . Предложена гипотеза для объяснения данной корреляции.

## Список литературы:

- Xu F., Zhang G., Luo M., Peng G., Chen Y., Yan T., Ye N. A powder method for the high-efficacy evaluation of electro-optic crystals // Nat. Sci. Rev. 2021. V. 8. P. 1-10.
- Pandey I.R., Khan S., Khan A., Kim Y.D., Kim H.J., Lee M.H. Growth, optical, and luminescence characterization of  $\text{LiCsMoO}_4$  crystal // J. Crys. Growth. 2022. V. 580. P. 126466.
- Matskevich N.I., Shlegel V.N., Semerikova A.N., Samoshkin D.A., Grigorieva V.D., Stankus S.V., Kuznetsov V.A., Ponomareva S.A., Zaithev V.P., Novikov A.Yu. Single crystals of undoped  $\text{Li}_2\text{WO}_4$  and  $\text{Li}_2\text{W}_{1.0,0125}\text{Mo}_{0.0125}\text{O}_4$ : formation enthalpies, heat capacity in the temperature 320–997 K // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 2130–2136.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 19-19-00095-П).*

*Авторы благодарят проф. К. Грэвса  
(Университет Бирмингема) за структурные  
исследования.*

УДК 536.6

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАМЕЩЕННОГО ГОЛЬМИЕМ ВИСМУТ-КОБАЛЬТОВОГО ОКСИДА

Мацкевич Н.И.<sup>1</sup>, Семерикова А.Н.<sup>1</sup>, Ткачев Е.Н.<sup>1</sup>, Зайцев В.П.<sup>1,2</sup>, Мацкевич М.Ю.<sup>1</sup>, Ануфриева О.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет водного транспорта,  
630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33

Соединения на основе дельта-формы оксида висмута широко используются в топливных элементах, кислородных керамических генераторах и др. [1, 2]. Они обладают одной из самых высоких ионных проводимостей среди твердых оксидов. Проблема заключается в том, что дельта-форма оксида висмута устойчива в очень узком интервале температур: 1000-1100 К. Для перспективного использования, с целью расширения области устойчивости, дельта-форма оксида висмута замещается элементами III–VI групп, в частности, редкоземельными элементами и переходными металлами. Ранее, в работах [1, 2] были исследованы висмут-рениевые оксиды, замещенные редкоземельными элементами. Однако рений является дорогостоящим элементом. К тому же, перренаты висмута достаточно гигроскопичны. В перренатах висмута рений окружен тетраэдрами из кислорода. В ряде оксидных соединений кобальт также имеет тетраэдрическое окружение. Поэтому в настоящей работе мы выбрали кобальт для замещения оксида висмута.

В настоящей работе методом твердофазного синтеза был синтезирован замещенный гольмием висмут-кобальтовый оксид состава  $\text{Bi}_{2.53}\text{Ho}_{0.31}\text{CoO}_{5.59}$ . В качестве прекурсоров для синтеза использовали оксид висмута (99.99%), оксид кобальта ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ , 99.7%) и оксид гольмия (99.99%). Перед синтезом оксиды нагревались при температуре 900 К для того, чтобы удалить следы влаги и диоксида углерода.

Исходные компоненты перемешивались в течение 70 ч в планетарной мельнице FRITZSCH pulverisette 6, спрессовывались в таблетки и отжигались в печи SNOL 4/1200 при температуре  $> 1000$  К в течение 50 ч.

Идентификацию соединения  $\text{Bi}_{2.53}\text{Ho}_{0.31}\text{CoO}_{5.59}$  проводили рентгенофазовым анализом на диффрактометре Shimadzu XRD-7000,  $\text{CuK}\alpha$ -излучение, 1.54178 Å, Ni-фильтр, интервал 10–110 градусов. Было установлено, что соединение имеет кубическую структуру флюорита, пространственная группа  $Fm-3m$ .

Для определения стандартной энтальпии образования использовали метод калориметрии растворения [3]. Эксперименты проводили при температуре 298.15 К в 1 М соляной кислоте в калориметре растворения с изотермической оболочкой. Калориметр и процедура проведения экспериментов детально описаны в работе [3]. Для проверки правильности работы калориметра в нем растворяли стандартное вещество – хлорид калия. Полученная нами энтальпия растворения хлорида

калия в пределах погрешности совпадала с величиной, рекомендованной в литературе.

Термохимический цикл был построен таким образом, что энтальпия растворения соединения  $\text{Bi}_{2.53}\text{Ho}_{0.31}\text{CoO}_{5.59}$  сравнивалась с энтальпией растворения оксида висмута, хлорида гольмия и хлорида кобальта. Энтальпии растворения  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HoCl}_3$ ,  $\text{Bi}_{2.53}\text{Ho}_{0.31}\text{CoO}_{5.59}$  были измерены в настоящей работе. Энтальпия образования хлорида кобальта, необходимая для определения стандартной энтальпии образования соединения  $\text{Bi}_{2.53}\text{Ho}_{0.31}\text{CoO}_{5.59}$ , была взята из литературы.

На основании полученных нами экспериментальных и литературных данных была рассчитана стандартная энтальпия образования замещенного гольмием висмут-кобальтового оксида ( $\text{Bi}_{2.53}\text{Ho}_{0.31}\text{CoO}_{5.59}$ ):  $\Delta_f H^0 = -1275.5 \pm 5.8$  кДж/моль. Далее, с использованием цикла Борна-Габеры была рассчитана энтальпия решетки.

Рассмотрение полученных в настоящей работе данных совместно с данными для аналогичных соединений, замещенных другими редкоземельными элементами, показало, что энтальпии решеток и стандартные энтальпии образования увеличиваются по абсолютной величине с уменьшением радиуса редкоземельного элемента. Обоснование наблюдаемых корреляций проведено с использованием анализа формулы Капустинского. Соединения с наименьшими радиусами редкоземельных элементов являются наиболее перспективными для применения.

### Список литературы:

1. Punm 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., Shlegel V.N., Semerikova A.N., Samoshkin D.A., Grigorieva V.D., Stankus S.V., Kuznetsov V.A., Ponomareva S.A., Zaithev V.P., Novikov A.Yu. Single crystals of undoped  $\text{Li}_2\text{WO}_4$  and  $\text{Li}_2\text{W}_{1-0.0125}\text{Mo}_{0.0125}\text{O}_4$ : formation enthalpies, heat capacity in the temperature 320-997 K // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 2130-2136.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 19-19-00095-П).

УДК 536.423

**ТЕПЛОПЕРЕНОС В НЕ ВПОЛНЕ УСТОЙЧИВЫХ И НЕУСТОЙЧИВЫХ ЖИДКОСТЯХ:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ****Мелких А.В.<sup>1</sup>, Скрипов П.В.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Уральский Федеральный университет им. Б.Н. Ельцина,  
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19<sup>2</sup> Институт теплофизики УрО РАН,  
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Неустойчивые и не вполне устойчивые (перегретые относительно линии равновесия жидкость-пар или жидкость-жидкость) состояния жидкостей имеют свои особенности теплообмена. Перевод жидкости в такие состояния, осуществляемый в кратковременном опыте, может сопровождаться как усилением, так и ослаблением теплообмена [1–4]. Как правило, изменения сосредоточены в узком интервале изменения температуры. В докладе обсуждаются результаты экспериментального и теоретического исследования интенсивности теплообмена в ходе трех процессов: спиноподобного распада раствора с нижней критической точкой растворения, пересечения окрестности критической точки жидкость-пар и быстрого приближения к температуре спонтанного вскипания углеводорода, содержащего микродобавки воды. Основой экспериментального исследования во всех случаях явился метод импульсного нагрева зонда, погруженного в исследуемое вещество. Одним из достоинств этого метода является то, что в ходе кратковременного нагрева не успевает развиться гравитационная конвекция, что позволяет исследовать более тонкие эффекты.

При определенной температуре теплообмен обводненных образцов предельных углеводородов интенсифицируется по сравнению с исходными образцами, не содержащими добавок воды [1].

Анализ кривых нагрева зонда в веществе показал, что при приближении к температуре спонтанного вскипания углеводорода обводненное вещество начинает проявлять аномалии тепловых свойств. Для их отчетливого выделения разработана специальная форма греющего импульса. Эффект возрастания коэффициента теплоотдачи обводненного образца, нехарактерный для чистой жидкости, имеет пороговый по температуре характер [1]. Влагосодержание для исходных образцов составляет 5 ppm (5 граммов воды на тонну углеводорода), обводненных – до 35 ppm (35 г/т). Примечательно, что увеличение давления выше 200–300 кПа нивелирует влияние влаги в данных температурных условиях у всех изученных углеводородов. Вместе с тем, теоретическое объяснение эффекта повышения теплоотдачи обводненных образцов отсутствует в литературе.

Рост коэффициента теплоотдачи обводненных образцов предельных углеводородов по сравнению с исходными при росте температуры может объясняться тем, что в обводненном образце существуют капли воды, которые начинают двигаться под действием различных причин. Такими причинами могут быть: эффект Марангони и реактивное движение капле при неравномерном испарении воды и поверхностное кипение. Построена модель теплоотдачи предельных углеводородов при импульсном нагреве с учетом различного содержания воды. В рамках модели рассмотрена динамика роста капле воды. При определенной температуре (меньшей температуры спонтанного вскипания основной жидкости) на поверхности раздела капли и основной жидкости начинается поверхностное кипение. Однако поскольку капли находятся в поле градиента температуры (из-за импульсного нагрева зонда), то интенсивность кипения оказывается различной на разных сторонах капли. Это обстоятельство приводит к возникновению реактивной силы, за счет которой капли начинают двигаться, что и приводит к интенсификации теплообмена. Поверхностное кипение объясняет пороговый характер эффекта, т.е. эффект начинается только при начале поверхностного кипения. С другой стороны, поверхностное кипение позволяет объяснить сильную зависимость эффекта от давления, поскольку при возрастании давления поверхностное кипение рано или поздно прекратится, а при уменьшении давления оно начнется при меньших температурах. Эффекты Марангони и реактивного движения капле могут служить своеобразными усилителями основного эффекта, вызванного поверхностным кипением.

Рассмотрены также модели нестационарного переноса тепла при спиноподобном распаде раствора пропиленгликоля в воде, перегретого относительно диффузионной спиноподобности [2], и пересечении (вдоль изобары) окрестности критической точки жидкость-пар чистого вещества [3, 4]. Общность обсуждаемых эффектов проявляется в том, что во всех случаях, во-первых, жидкости в том или ином смысле являются неустойчивыми. Во-вторых, они переходят в микрогетерогенное состояние, подготавливающее макроскопический фазовый переход. Данное обстоятельство может способствовать как интенсификации, так и снижению интенсивности теплообмена.

## Список литературы:

1. Lukynov, K.V., Starostin, A.A., Skripov, P.V. Heat transfer under high-power heating of liquids. 4. The effect of water admixtures on the heat transfer in superheated hydrocarbons, 2017, Vol. 106, pp. 657–665.
2. Skripov, P.V., Igolnikov, A.A., Rutin, S.B., and Melkikh, A.V., Heat Transfer by Unstable Solution Having the Lower Critical Solution Temperature, Int. J. Heat Mass Transfer, 2022, vol. 184, p. 122290.
3. Rutin S.B., Igolnikov A.A., Skripov P.V., High-Power Heat Release in Supercritical Water: Insight into the Heat Transfer Deterioration Problem, J. Eng. Thermophys., 2020, Vol. 29, pp. 67–74.
4. P.V. Skripov, S.B. Rutin, Features of supercritical heat transfer at short times and small sizes, Int. J. Thermophys, 2021, V. 42. 110.

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 19-19-00115-П.*

УДК 539.232

## СЕПАРАЦИЯ ЭМУЛЬСИЙ ВОДЫ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ГИДРОФОБНЫХ МЕМБРАНАХ

Мельник А.В.<sup>1,2</sup>, Богословцева А.А.<sup>1,2</sup>, Сафонов А.И.<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Разделение нефти и воды является актуальной задачей для нефтедобычи, экологии, экономики, научных исследований и других областей. Во-первых, частые аварийные разливы нефти вызывают серьезную озабоченность, поскольку это может привести не только к серьезным экологическим последствиям, но также к большим экономическим потерям, связанными с затратами по сбору разлившихся нефтепродуктов и по очистке окружающей среды [1]. Кроме того, в последние годы в результате промышленного развития увеличилось количество используемой нефти, что неизбежно привело к образованию больших объемов нефтесодержащих сточных вод и загрязнению пресной воды [2]. Во-вторых, самым распространенным способом нефтедобычи является закачка воды в пласт нефти с целью увеличения пластового давления и последующего вытеснения нефти к забою. Таким образом, стадия обезвоживания является неотъемлемой частью нефтепереработки [3].

Ввиду того, что существующие методы сепарации имеют ограничения, вызванные большими энергозатратами, низкой эффективностью разделения, образованием вторичных загрязнителей и др., начались разработки более эффективных методов разделения эмульсий. Поэтому в середине XX века было предложено применение мембран для сепарации водонефтяных эмульсий [4]. Затем начались попытки модификации поверхности мембран, путём придания ей различных свойств смачивания [5]. Благодаря этому усовершенствованию эффективность сепарации на мембранах значительно повысилась и метод стал конкурировать с уже известными. Это дало стимул для развития методов изготовления сепарационных мембран с модифицированной поверхностью.

Фторполимер хорошо подходит для использования в качестве гидрофобных покрытий для мембран, так как обладает такими привлекательными потребительскими свойствами, как: высокая химическая стабильность; высокая биосовместимость; высокая гидрофобность; гибкость, эластичность и масштабируемость.

Для изготовления сепарационных мембран для экспериментального стенда фторполимерные покрытия наносились на поверхности металлических сеток с помощью метода Hot Wire CVD.

Успех метода HW CVD во многом объясняется его различными преимуществами, включая высокую скорость осаждения, отсутствие повреждений поверхности, вызванных плазмой (характерной для ряда PVD и CVD методов), однородность покрытий при осаждении на большие площади, а также возможность получать фторполимерные покрытия с различными свойствами смачивания.

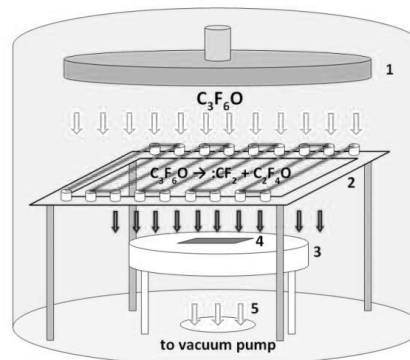


Рис. 1. Схема метода HW CVD: 1 – поток газа-предшественника ( $C_3F_8O$ ); 2 – сеть горячих нитей катализатора; 3 – охлаждаемая мишень; 4 – подложка для нанесения покрытия; 5 – вакуумно-насосная система.

Полученные результаты показали, что изготовленные мембраны могут быть использованы для устойчивого разделения эмульсий. Было установлено, что свойства смачивания фторполимерного покрытия влияют на скорость и эффективность сепарации: чем больше краевой угол смачивания поверхности с водой, тем лучше эффективность, но ниже скорость сепарации. Полученные мембраны были использованы для сепарации эмульсий, состоящих из воды и различных нефтепродуктов (нефть, бензин, керосин). Поскольку, физические свойства бензина и керосина значительно отличаются от воды, то сепарации таких смесей была эффективнее и быстрее, чем более устойчивых эмульсий, состоящих из воды и нефти. Проведенные эксперименты показали, что мембраны, изготовленные методом Hot Wire CVD, могут быть использованы несколько раз благодаря возможности очистки.

## Список литературы:

1. Spaulding M. L. State of the art review and future directions in oil spill modeling // Marine pollution bulletin. 2017. Т. 115. №. 1–2. С. 7–19.
2. Joye, Samantha B. "Deepwater Horizon, 5 years on." Science 349.6248 (2015): 592-593.
3. Gossen L. P., Velichkina L. M. Environmental problems of the oil-and-gas industry // Petroleum Chemistry. 2006. Т. 46. №. 2. С. 67–72.
4. Paul D. et al. Membrane filtration for oil-water emulsion separation // Chem. Tech. (Leipzig); (German Democratic Republic). 1979. Т. 31. №. 1.
5. Srijaroonrat, P., E. Julien, and Y. Aurelle. "Unstable secondary oil/water emulsion treatment using ultrafiltration: fouling control by backflushing." Journal of Membrane Science 159.1-2 (1999): 11–20.

Работа выполнена при поддержке  
госбюджетного гранта ИТ СО РАН.

УДК 532.526

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ВИХРЕВУЮ СТРУКТУРУ ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ БПЛА КЛАССИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ С ФЮЗЕЛЯЖЕМ

Мельник Е.А., Павленко А.М., Занин Б.Ю., Алпацкий Н.С., Каприлевская В.С.

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

В настоящее время во многих странах мира широко используются беспилотные летательные аппараты самого различного назначения с отличающимися лётно-техническими характеристиками [1]. Область их применения постоянно расширяется и для более успешного применения необходимо проводить фундаментальные исследования таких важных аэродинамических явлений, как локальные отрывные области и глобальный срыв потока. Данная работа направлена на экспериментальное исследование влияния элевон и фюзеляжа на вихревую структуру обтекания на прямом крыле и является логическим продолжением цикла исследований, посвящённых изучению отрывных течений и возможностей управления обтеканием различной компоновки моделей БПЛА [2, 3].

Исследования проводились в дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН. Эта труба замкнутого типа, которая имеет закрытую рабочую часть размерами  $1 \times 1 \text{ м}^2$  и длиной 4 м. Уровень турбулентности потока в рабочей части менее 0,04%. Скорость набегающего потока в экспериментах варьировалась в диапазоне от 10 до 25 м/с, число Рейнольдса по хорде  $Re=0,9-1,6 \cdot 10^5$ . Исследования проводились при различных углах атаки, не превышающих  $18^\circ$ , а также при углах скольжения в  $0$ ,  $15$  и  $30^\circ$ . В экспериментах использовалась модель БПЛА с прямым крылом, спроектированная с помощью программного комплекса SolidWorks (рис. 1) и распечатанная на 3D принтере.

Особенностью данной работы является то, что исследования проводились не только на верхней поверхности крыла без фюзеляжа и с ним, но и на нижней поверхности. Также был проведен эксперимент, когда в качестве источника турбулентности использовалась нить. Она натягивалась в начале рабочей части так, чтобы турбулентный след от нити попадал на модель БПЛА. Кроме этого для изучения возможности управления обтеканием с помощью локального воздействия вблизи передней кромки крыла устанавливались выступы в форме конуса. Визуализация течения осуществлялась с помощью метода «саже-масляных» покрытий. Поверхность модели крыла покрывалась специальным раствором (смесь порошка двуокиси титана и керосина), затем модель устанавливалась в рабочую часть трубы и оставалась под воздействием набегающего потока. Постепенно керосин испарялся, а порошок двуокиси титана оставался на поверхности в соответствии с линиями тока тем самым, проявляя структуру течения.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов были получены картины визуализаций обтекания модели при различных режимах и при разных

углах отклонения органов управления. Исследована возможность управления вихревыми структурами методом локального воздействия. Показана возможность изменения структуры течения таким методом.

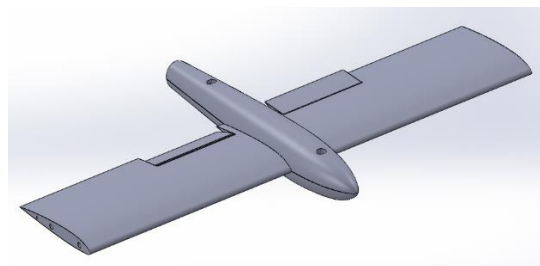


Рис. 1. Проект модели БПЛА.

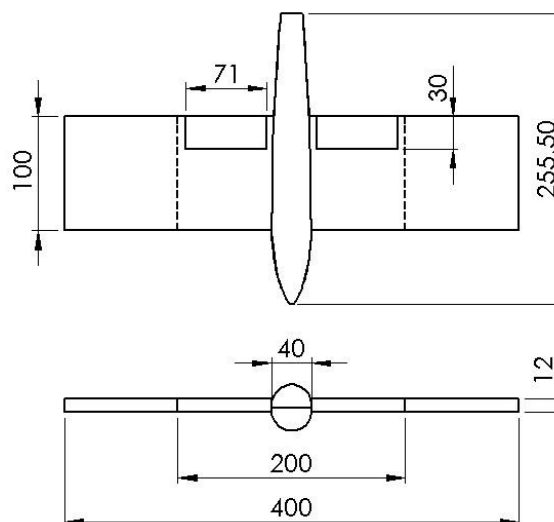


Рис.2. Геометрические размеры модели БПЛА

### Список литературы:

1. Kellermann R., Biehle T., Fischer L., Drones for parcel and passenger transportation: A literature review // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. 2020. Vol. 1. 100088. DOI:10.1016/j.trip.2019.100088.
2. 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. – S.I.: 2018. –Vol. 2027 No. 1. –P. 040004(7). DOI: 10.1063/1.5065278.
3. N S Alpatskiy, A M Pavlenko, A V Bykov, B Y Zanin 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 620.186

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА И ОТЖИГА НА РАЗМЕР ЗЕРНА ТОНКОЙ ПЛЕНКИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ****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

В настоящее время в сфере солнечной энергетики и микроэлектроники непрерывно растут потребности полупроводниковой промышленности в производстве тонких пленок поликристаллического кремния (poly-Si). Перспективным методом формирования пленки poly-Si высокого качества [1] является метод алюминий-индуцированной кристаллизации аморфного кремния. Получение пленок poly-Si на стеклянных подложках данным методом является актуальным направлением, поскольку позволяет создавать солнечные элементы с высоким КПД, путем снижения стоимости за счет недорогих низкотемпературных подложек. Для светопоглощающих слоев СЭ на основе поликремния, размер зерен значительно влияет на эффективность устройства: высокая эффективность достигается при среднем размере зерна порядка 100 мкм и уменьшается с уменьшением среднего размера кристаллита [2]. Обеспечить дальнейший рост эффективности таких элементов можно путем увеличения среднего размера кристаллита в пленке и, соответственно, уменьшения площади границ зерен.

Одним из факторов, влияющих на размер зерна пленки поликремния, формирующейся в процессе отжига, является средний размер зерна исходной пленки поликристаллического алюминия (poly-Al), так как известно, что формирование зародышей кристаллического поликремния начинается на границах зерен poly-Al [3]. Таким образом, увеличение среднего размера зерна пленки poly-Al является актуальной задачей. Увеличить средний размер зерна тонкой пленки poly-Al возможно путем варьирования параметров синтеза в процессе осаждения тонкой пленки, а также путем высокотемпературного отжига.

В работе было исследовано влияние параметров синтеза и отжига на средний размер зерна тонких пленок poly-Al на подложках из монокристаллического кремния.

На подложках из монокристаллического кремния, покрытых слоем естественного окисла методом термовакуумного осаждения были сформированы тонкие

пленки poly-Al ( $d=160$  нм). Осаждение производилось при максимальном и минимальном значениях температуры ( $T_{\text{syn}}=80$  и  $160^\circ\text{C}$ ) и скорости синтеза ( $V_{\text{syn}}=10$  и  $113$  нм/мин). Таким образом были получены четыре группы образцов: а)  $T_{\text{syn}}=80^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{syn}}=10$  нм/мин; б)  $T_{\text{syn}}=80^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{syn}}=113$  нм/мин; в)  $T_{\text{syn}}=160^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{syn}}=10$  нм/мин; д)  $T_{\text{syn}}=160^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{syn}}=113$  нм/мин. Полученные структуры подвергались отжигу в вакуумной печи ( $10^{-5}$  Па), при температурах  $400$  и  $550^\circ\text{C}$  в течение  $15$  часов.

Для четырех групп образцов до и после отжига при температурах  $400$  и  $550^\circ\text{C}$  были получены изображения поверхности на электронном микроскопе (SEM). В результате анализа SEM изображений был сделан вывод, что температура синтеза оказывает более сильное влияние на средний размер зерна poly-Al, чем скорость синтеза тонких пленок. Значения среднего размера зерна с кристаллической ориентацией (111) для образцов до и после отжига были получены с помощью рентгеноструктурного анализа. Для пленок, отожженных при более высокой температуре итоговые значения среднего размера зерна poly-Al получились выше, чем для образцов, подвергавшихся отжигу при низкой температуре. Снимки поверхности (2D и 3D) образцов до и после отжига, а также среднеквадратичное значение шероховатости поверхности были получены на сканирующем зондовом микроскопе NT-MDT «Solver Next».

## Список литературы:

1. Toko K., Suemasu T. Metal-induced layer exchange of group IV materials //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2020. – Т. 53. – №. 37. – С. 373002.
2. Bergmann R. B. Crystalline Si thin-film solar cells: a review //Applied physics A. – 1999. – Т. 69. – №. 2. – С. 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.

*Работа выполнена по государственному заданию  
ИТ СО РАН, проект № 121031800218-5.*

УДК 533.6.01; 711.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТНОСТИ ЗДАНИЯ НА РАЗМЕРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕТРОВЫХ ЗОН

Мешкова В.Д.<sup>1</sup>, Дектерев А.А.<sup>1,2</sup>, Шульженко П.Д.<sup>1</sup>, Филимонов С.А.<sup>1,2</sup>, Литвинцев К.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
630073, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

На протяжении многих десятилетий строительство зданий выполняется согласно строительным нормам и правилам. Знания и опыт, которые заложены в них позволяют возводить сооружения, отвечающие требованиям безопасности. Используемые подходы и методы были получены в результате выполнения различного рода исследований, результаты которых и легли в основу имеющихся нормативных документов. Но научно-технический прогресс не стоит на месте и с каждым годом происходит усовершенствование различных методов исследования. Например, экспериментальные методы дополнились методами вычислительной гидродинамики (CFD), которые позволяют решать множество прикладных задач в градостроительстве.

Последнее время, особое внимание уделяется изучению формирования различных ветровых зон, образующихся в результате обтекания потоком воздуха зданий. Результаты позволяют оценить взаимодействие объектов городской среды с природными факторами, и определить их взаимное влияние на жизнедеятельность человека. В связи с этим, работа посвящена численному исследованию влияния высоты здания на формирование ветровых зон, а также выполнено сопоставление результатов моделирования с данными расчетов по нормативным документам. Рассматривались два объекта куб ( $H \times L \times B$ , где  $H=L=B=50$  м) и параллелепипед ( $2H \times L \times B$ ), имитирующих здания разной высоты.

Исследования выполнялись с помощью ПО «SigmaFlow», в котором реализована математическая модель, основанная на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье—Стокса для несжимаемых течений с переменной плотностью для замыкания которой использовалась двухпараметрическая  $k-\omega$  SST модель турбулентности. Данная модель была ранее верифицирована на основании данных численных экспериментов и продемонстрировала адекватную предсказательную способность [2]. При обтекании моделей-зданий формируются три устойчивых зоны: 1 – зона подпора ветрового потока, с понижением скорости, характеризующаяся квазистационарным вихрем (по Э.И. Реттеру [3]); 2 – локальные области ускорения, которые возникают за счет срыва потока с граней зданий и приводящая к увеличению скорости. На верхней грани наблюдается идентичный эффект, сопровождаемый формированием интенсивной турбулентной структуры в зоне отрыва потока. За зданием образуется зона с рециркулирующим движением – аэродинамическая тень (рис. 1). Для исследуемых объектов также были получены размеры аэродинамической тени, рассчитанные согласно нормативным документам. Согласно руководству [4] с помощью формулы (1) можно рассчитать глубину (протяженность) аэродинамической тени за зданием, а также определить общую площадь ветрового затенения (2).

$$l = H\sqrt{8L/H} \quad (1) \quad S = 0,8 \cdot L \cdot l \quad (2)$$

где  $H$  – высота здания, м;  $L$  – длина здания, м;  $B$  – ширина здания, м;  $l$  – глубина ветровой тени, м;  $S$  – ветровая площадь затенения, га.

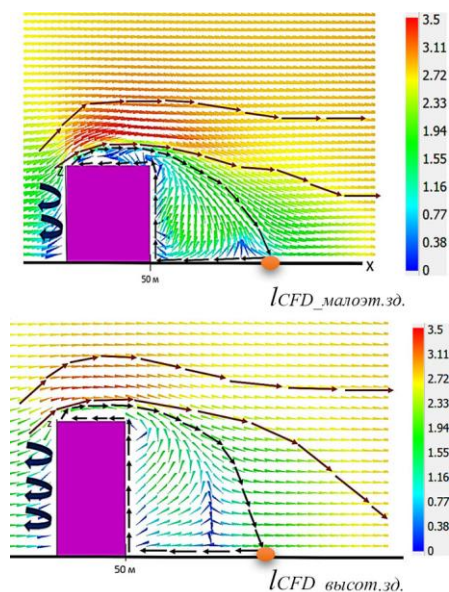


Рис. 1. Обтекание зданий разной высоты турбулентным потоком с описанием основных ветровых зон, м/с.

- границы аэродинамической тени;
- локальная зона ускорения переходящая в зону отрыва;
- U зона подпора потока.

В соответствии с рассматриваемыми геометрическими размерами было определено, что  $l_{\text{малозт.зд.}} = 141$  м,  $S_{\text{малозт.зд.}} = 0,56$  га;  $l_{\text{высот.зд.}} = 200$  м,  $S_{\text{высот.зд.}} = 0,8$  га. Согласно выполненным численным исследованиям было выявлено, что протяженность аэродинамической тени  $l_{\text{CFD\_малозт.зд.}} = 120$  м;  $l_{\text{CFD\_высот.зд.}} = 160$  м. Соответственно, согласно формуле (2),  $S_{\text{CFD\_малозт.зд.}} = 0,48$  га;  $S_{\text{CFD\_высот.зд.}} = 64$  га. Анализируя результаты, было выявлено, что значения, получаемые по нормативным оценкам, превышают значения численных исследований на 25–30%.

### Список литературы:

- Мешкова, В.Д. SigmaFlow как инструмент исследования ветрового комфорта в условиях городской среды / В.Д. Мешкова, А.А. Дектерев, С.А. Филимонов, К.Ю. Литвинцев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(3). С. 000–000. DOI: 10.17516/1999-494X-0398
- Э. И. Реттер, Стриженов С.И. Аэродинамика зданий // Стройиздат. – 1968.
- Руководство по оценке и регулированию ветрового режима жилой застройки / ЦНИИП градостроительства. — М.: Стройиздат\* 1986. 59 с.

Работа поддержана РНФ (грант № 22-61-00098).

УДК 543.318.3; 621.18:662.9

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В КОАКСИАЛЬНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ПОТОКАХ КУЭТТА – ТЕЙЛОРА

Миськив Н.Б., Мамонов В.Н., Назаров А.Д., Серов А.Ф.

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

В [1] авторами было предложено рассмотреть в качестве теплогенератора для прямого преобразования механической энергии в тепло устройство, в котором два коаксиальных встречно вращающихся многощелевых ротора, образуют систему цилиндрических кольцевых каналов, заполненных вязкой рабочей жидкостью. В такой системе кольцевых каналов реализуется течение Куэтта-Тэйлора. При работе устройства в рабочей жидкости за счет больших сдвиговых напряжений выделяется тепловая энергия.

Настоящая работа является продолжением исследований, проведенных авторами в [1–3], где были представлены результаты экспериментов по измерению мощности, выделяемой теплогенератором предложенной конструкции. Результаты этих экспериментов демонстрируют принципиальную возможность практического использования подобных устройств.

Для исследования структуры течения была использована методика анализа амплитудно-частотных спектров пульсаций момента силы сопротивления вращению роторов теплогенератора. Анализировался непосредственно сигнал с цифрового оригинального тензодатчика динамометра, измеряющего момент сопротивления вращению роторов. Экспериментальное оборудование и методы измерения подробно описаны в [1, 3].

Эксперименты проводились при постоянной относительной скорости вращения роторов 44 рад/с в диапазоне изменения кинематической вязкости рабочей жидкости (вода-глицериновая смесь) от  $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Представляют интерес результаты, полученные при исследовании низкочастотной и высокочастотной областей спектров. Исследования показали, что структура амплитудно-частотного спектра пульсаций момента силы сопротивления вращению роторов в низкочастотной области ( $F = 0\text{--}40 \text{ Гц}$ ) жестко связана с частотой вращения роторов ( $F \sim 14 \text{ Гц}$ ) и конструктивными особенностями щелевого пространства роторов (эксцентricность, эллипсность).

На рис. 1 приведены спектры для двух значений вязкости рабочей жидкости, в области частот (200–550) Гц. В этой области наблюдаются явно выраженные «горбы», соответствующие вихревым образованиям, которые можно связать с шириной зазоров в мультицилиндровой конструкции роторов теплогенератора. В конструкции роторов теплогенератора имелись две группы кольцевых зазоров: шириной 2 мм и шириной 3,6 мм. Логично предположить, что вихревые структуры, генерирующие пульсации потока в области частот от 200 Гц до 300 Гц возникают в кольцевых зазорах шириной 3,6 мм, а вихревые структуры в

области частот от 450 Гц до 550 Гц соответствуют кольцевым зазорам шириной 2 мм.

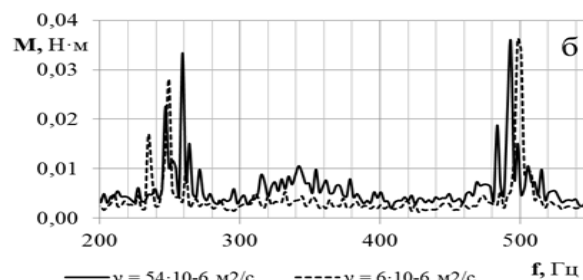
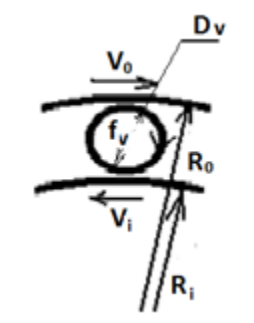


Рис. 1. Высокочастотная область спектров пульсаций момента силы сопротивления вращению роторов теплогенератора при вязкости рабочей жидкости  $\nu = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  и  $\nu = 54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

На рис. 2 приведена схема образования таких вихревых структур в кольцевом зазоре теплогенератора.



$V_0, V_i$  – линейная скорость, соответственно, внешнего и внутреннего цилиндров кольцевого зазора теплогенератора;  
 $R_0, R_i$  – радиусы внешнего и внутреннего цилиндров;  
 $D_v$  – диаметр вихревой структуры (максимальный размер равен ширине кольцевого зазора  $\delta$ );  
 $f_v$  – частота вихревой структуры (вихри Тэйлора).

Рис. 2. Схема образования вихревой структуры в кольцевом зазоре теплогенератора.

Минимальная частота вращения такого вихря определяется выражением:  $f_v = \frac{V_0}{\pi \sigma}$ .

Оценочные расчеты дают следующие диапазоны частот для этих структурных образований: (200–290) Гц для ширины зазора 2 мм и (350–530) Гц для ширины зазора 3,6 мм, что хорошо коррелирует с экспериментально измеренными спектрами.

### Список литературы:

1. Serov A.F., Nazarov A.D., Mamonov V.N., Terekhov V.I. Experimental investigation of energy dissipation in the multi-cylinder Couette-Taylor system with independently rotating cylinders // Applied Energy 251 (2019) 113362.
2. Serov A.F., Mamonov V.N., Terekhov V.I., Nazarov A.D. Patent for Invention “Opposite wind-head Generator”. №2612237.03 March (2017).
3. 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.



УДК 536.24

## ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ СЛОЯ ЖИДКОСТИ В МОДЕЛИ ТОПЛИВНОГО БАКА НА СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН В РЕЖИМЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ

Митин К.А.<sup>1</sup>, Бердников В.С.<sup>1,2</sup>, Митина А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

С развитием авиационной техники заметно растут требования к качеству проведения расчётов термических напряжений в неизотермических тонкостенных элементах конструкций летательных аппаратов (ЛА) [1]. Расчёт термических напряжений требует знаний о тепловом состоянии тонкостенных конструкций ЛА, которое изменяется от взлёта до посадки. При полётах на сверхзвуковых скоростях необходим учет разогрева обшивки ЛА. Тепловое состояние тонкостенной конструкции ЛА существенно зависит от процессов нестационарного сопряжённого конвективного теплообмена в топливных баках и в воздушных прослойках фюзеляжа. Распределение температуры, градиентов температуры и термических напряжений в стенках топливных баков зависят от сопряжённого конвективного теплообмена. Аналогичные проблемы характерны для многих технических устройств в режимах включения и выключения нагрева или охлаждения. При подводе тепла к стенкам бака, за счёт сопряжённого теплообмена нагревается жидкость вблизи стенок, которая впоследствии всплывает и накапливается сверху. Таким образом в неравномерно нагретых объёмах жидкости, находящихся в поле тяжести, развиваются термогравитационные конвективные течения, сопровождающиеся расслоением жидкости по температуре, а при наличии неизотермической свободной границы раздела «жидкость - газ» развивается термокапиллярная конвекция. Существенное влияние на закономерности сопряжённого свободноконвективного теплообмена оказывает пространственная форма конвективных течений. В свою очередь форма конвективных течений в значительной мере зависит от конфигурации полости и расположения разогретых и охлаждённых стенок и их фрагментов [1-2].

Для адекватных оценок теплового состояния конструкции, а в последствии и термических напряжений в конструкции, необходимо знать локальные особенности сопряжённого свободноконвективного теплообмена и, как их следствие, закономерности зависимостей полей температуры от времени в тонких стенках. Достоверные знания о закономерностях сопряжённого свободноконвективного теплообмена с нестационарными условиями на внешних и внутренних поверхностях, важны при проведении оценок и точного расчёта термических напряжений и анализе общего напряженно-деформированного состояния конструкции. Данная работа, является развитием проведённых в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО

РАН серии работ, направленных на изучение влияния сопряжённого свободноконвективного теплообмена на распределение температуры в тонких стенках.

Численно в сопряжённой постановке исследовано развитие нестационарной гравитационно-капиллярной конвекции в слое этилового спирта со свободной поверхностью после внезапного разогрева электрическим током одной из вертикальных стенок прямоугольной полости. Изучено влияние набегающего потока горячей жидкости на эволюцию во времени поля температуры на противоположной тонкой стенке полости. Исследования проводились в расчётной области, соответствующей условиям физического эксперимента [2] и при расчётной области, в которой частично заполненный топливом бак имел жесткую верхнюю стенку над воздушной прослойкой. Расчёты проведены при различных плотностях теплового потока на разогреваемой боковой стенке. Решалась система уравнений термогравитационной конвекции в приближении Буссинеска в безразмерном виде, записанная в терминах температуры, векторного потенциала поля скорости и вихря скорости. Учтена конвективная теплоотдача с внешней стороны тонкой стенки. Изучена эволюция конвективных течений, с учётом термокапиллярного эффекта на свободной поверхности жидкости, и полей температуры в жидкости, газе и в тонкой стенке после натекания потока нагретой жидкости и внезапного подвода тепла к её внутренней стороне. Показано, что при увеличении плотности теплового потока на нагреваемой стенке возрастает роль термокапиллярного эффекта и увеличивается скорость продвижения фронта нагретой жидкости вдоль свободной поверхности. Наличие верхней стенки бака существенно влияет на процессы теплоотдачи со свободной поверхности жидкости.

### Список литературы:

1. Белов В. К., Белов В. В. Прочность и устойчивость ракетных и авиационных конструкций при термосиловом нагружении. Монография / Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 491 с.
2. K. A. Mitin, V. S. Berdnikov, N. I. Bodneva, V. O. Ryabov Conjugate heat transfer in the mode of thermal gravitational-capillary convection in the model of a fuel tank after a sudden heating of the sidewall // Journal of Physics: Conference Series - 2021, Volume 2119, doi:10.1088/1742-6596/2119/1/012164.

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

УДК 536.24

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ДЛИНЫ КРИСТАЛЛА НА СОПРЯЖЁННЫЙ ТЕПЛООБМЕН КРИСТАЛЛА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ В МЕТОДЕ ЧОХРАЛЬСКОГО

Митин К.А.<sup>1</sup>, Бердников В.С.<sup>1,2</sup>, Митина А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

В реальном высокотемпературном технологическом процессе вытягивания кристалла со свободной поверхности расплава методом Чохральского теплообмен имеет сложный сопряжённый характер и поля температуры самосогласованны во всей ростовой камере [1, 2]. В этом методе монокристалл вытягивается со свободной поверхности расплава на затравочный кристалл с заданной кристаллографической ориентацией. На начальной стадии разращивания кристалла до заданного диаметра отвод тепла от фронта кристаллизации происходит в основном за счёт теплопроводности через монокристалл в охлаждаемый шток, на котором он закреплён. По мере роста монокристалла теплоотдача все в большей степени осуществляется от его боковых образующих за счёт конвективного и радиационного механизмов теплообмена. Относительная роль кондуктивного теплоотвода через монокристалл и шток зависит от длины кристалла и от коэффициентов теплопроводности монокристалл и штока. Интенсивность радиационно-конвективной теплоотдачи от кристалла зависит от перепада температуры между фронтом кристаллизации и холодными стенками ростовой камеры, заполненной газом. Управление условиями роста кристалла является достаточно сложной задачей, так как нестационарность и нелинейность задач сопряжённого радиационно-конвективного теплообмена между кристаллом, расплавом и окружающей средой обусловлена монотонным изменением геометрии и граничных условий по мере роста кристалла. Как правило, даже в рамках глобального моделирования задачи решаются при дискретном наборе геометрий расчётных областей по мере роста кристалла. Решения задач в полной сопряжённой постановке, которая требует практически невозможного точного задания граничных условий, соответствующих реальному процессу, требует больших вычислительных и временных ресурсов. Поэтому для понимания общих закономерностей зависимости полей температуры в кристаллах от интенсивности теплоотдачи с их образующих и соответствующих термических напряжений целесообразно решать задачи в рамках частичного моделирования [3, 4]. Не претендуя на полное описание процессов, частичное моделирование позволяет определить основные тенденции в поведении рассматриваемых систем при изменении отдельных управляющих параметров или их группы.

Численно, методом конечных элементов, в сопряжённой постановке исследована теплоотдача от моно-

кристалла в ростовую камеру в кондуктивном, радиационно-кондуктивном, конвективном и радиационно-конвективном режимах теплообмена. При учёте конвективных механизмов теплообмена рассматривалась отдельно термогравитационная конвекция, отдельно центробежная конвекция, возникающая в следствии вращения кристалла, совместное влияние центробежных сил и сил плавучести. Исследования проводились при геометрии подобной упрощённой схеме верхней части теплового узла в методе Чохральского на различных стадиях технологического процесса (длины кристалла). Изучено влияние теплопроводности кристалла на закономерности теплообмена монокристалла с окружающей средой в ростовой камере. Решалась система уравнений смешанной конвекции в переменных вихрь, функция тока и температура с учётом равномерного вращения кристалла. Расчёты радиационных потоков проведены на основе зонального метода при следующих предположениях: расчётная область ограничена замкнутой системой поверхностей; все поверхности системы – серые, диффузно-излучающие и диффузно-отражающие; поверхности разбиты на зоны, в пределах которых радиационные свойства и температура могут считаться постоянными; среда, заполняющая ростовую камеру - диатермична.

Моделирование выполнено при числе Прандтля равному 0,68 (аргон), в диапазоне перепадов температуры, соответствующих значениям чисел Грасгофа от 1000 до 16000, при отношениях длин монокристалла к радиусу от 1 до 8. Изучена теплоотдача от неподвижных и равномерно вращающихся кристаллов в диапазоне скорости вращения от 0 до 25 оборотов в минуту.

### Список литературы:

1. Мильвидский М. Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике. – М.: Наука. 1986. – 144 с.
2. Простомолотов А.И., Мильвидский М.Г. // Известия Вузов. Материалы электронной техники. 2008. №3. С. 49.
3. Бердников В.С., Митин К.А., Григорьева А.М., Клещенко М.С. Зависимость полей температуры в кристаллах от их теплофизических параметров и свойств окружающей среды в методе Чохральского при различных режимах теплообмена // Известия РАН. Серия Физическая. – 2017. – № 9. – С. 1198 – 1204.
4. Mitin K.A., Berdnikov V.S. Effect of uniform crystal rotation on convective and radiation-convective heat transfer in the Czochralski method // Journal of Physics: Conference series – 2019, V. 1382 012198. doi:10.1088/1742-6596/1382/1/012198

*Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (Ш.18.2.5, Гос.Рег. АААА-А17-117022850021-3)*

УДК 532.5

**ОСОБЕННОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЗАМКНУТОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА И РЕБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ****Михайленко С.А., Шеремет М.А.**Научно-исследовательский Томский государственный университет,  
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Анализ естественной конвекции представляет интерес при решении многих технических задач. Распространённой задачей является охлаждение электронной аппаратуры и повышение эффективности охлаждения с помощью пассивного отвода тепла [1, 2]. Часто можно встретить устройства, имеющие конструктивные вращающиеся элементы, или устройства, подверженные вращению в процессе эксплуатации.

На рис. 1 изображена квадратная полость размера  $H$  с тепловыделяющим элементом и реберным радиатором. Полость вращается вокруг оси, проходящей через центр области решения с постоянной угловой скоростью  $\xi_0$ . На нижней стенке полости находится ребреная теплопроводная подложка, окружающая тепловыделяющий источник. Стенки полости, соприкасающиеся с подложкой, являются теплоизолированными. Остальные стенки поддерживаются при постоянной охлаждающей температуре  $T_c$ . Полость заполнена ньютоновской несжимаемой жидкостью  $Pr = 0.7$ , удовлетворяющей приближению Буссинеска. Все теплофизические параметры жидкости не зависят от температуры, течение считается ламинарным. Теплофизические свойства теплопроводной подложки соответствуют алюминию, в то время как теплофизические свойства тепловыделяющего источника соответствуют кремнию.

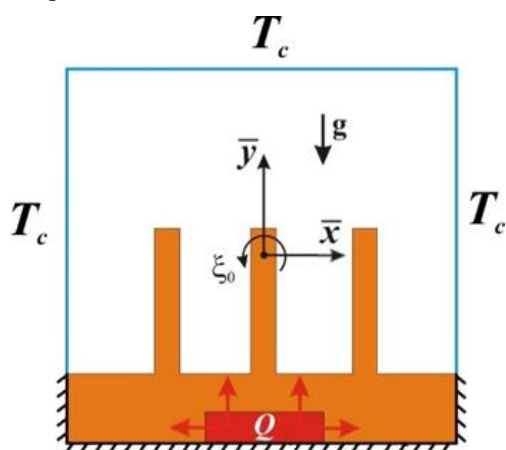


Рис. 1. Физическая постановка.

Дифференциальные уравнения, описывающие естественно-конвективный теплообмен во вращающейся полости, основаны на законах сохранения массы, количества движения и энергии. Система уравнений записана в безразмерных переменных «функция тока – завихренность – температура». Более подробное описание уравнений представлено в работе [3].

Полученная система уравнений решалась при следующих начальных и граничных условиях: в началь-

ный момент времени жидкость покоится и ее безразмерная температура равна нулю. Условия прилипания и непротекания применяются для компонент вектора скорости на стенках полости и реберного радиатора. Стенки полости, соприкасающиеся с теплопроводной подложкой, являются адиабатическими. Безразмерная температура на остальных стенках равно нулю. На границах между тепловыделяющим источником и подложкой, а также между радиатором и жидкостью используется граничное условие четвертого рода.

Для решения сформулированной системы дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями применялся метод конечных разностей на равномерной сетке. Дифференциальное уравнение для функции тока аппроксимировалось с помощью центральных разностей и решалось методом последовательной верхней релаксации. Для решения остальных уравнений применялась локально-одномерная схема А.А. Самарского [4]. Полученные системы линейных алгебраических уравнений решались методом прогонки.

Для анализа интенсивности теплообмена использовалось среднее число Нуссельта на поверхности ребренного радиатора, а также средняя температура тепловыделяющего элемента.

Сформулированная математическая модель и разработанный численный алгоритм были верифицированы с помощью задачи естественной конвекции во вращающейся квадратной полости [5].

Результаты получены в широком диапазоне изменения определяющих параметров. Проанализированы распределения среднего числа Нуссельта и средней температуры источника энергии для различных значений определяющих параметров.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

## Список литературы:

1. Jin L.F., Tou K.W., Tso C.P. Experimental and numerical studies on a rotating cavity with discrete heat sources with conjugate effects // *Exp. Heat Transfer*. 2005. Vol. 18. P. 259–277.
2. Banerjee S., Mukhopadhyay A., Sen S., Ganguly R. Thermomagnetic Convection in Square and Shallow Enclosures for Electronics Cooling // *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2009. Vol. 55(10). P. 931–951.
3. Mikhailenko S.A., Buonomo B., Manca O., Sheremet M.A. Cooling of periodically heat-generated element under the convective-radiative heat transfer in a rotating domain with a thermally conducting base plate // *International Journal of Thermal Sciences*. 2021. Vol. 170. 107150.
4. Теория разностных схем / Самарский А.А.; Москва: Наука, 1977. 656 с.
5. Lee T.L., Lin T.F. Transient three-dimensional convection of air in a differentially heated rotating cubic cavity // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1996. Vol. 39(6). P. 1243–1255.

УДК 536.24

## ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА НА ПОВЕРХНОСТИ С КОНТРАСТНОЙ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ

Михайлова А.В.<sup>1,2</sup>, Зайцев Д.В.<sup>1</sup>, Гришков В.А.<sup>1</sup>, Никитин А.А.<sup>1</sup>, Кабов О.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
senya\_mik@ngs.ru

Управление тепломассообменом и динамикой жидкости при конденсации пара посредством поверхностей со специальными покрытиями является одной из важнейших нерешенных проблем теплофизики и гидродинамики, которой в данный момент в мире активно занимаются несколько научных групп в США, Германии, Франции, Китае. Конденсация пара на гибридных поверхностях с различной смачиваемостью в последние годы интенсивно исследуется экспериментально. Одним из перспективных направлений является создание и использование поверхностей с градиентным смачиванием. Использование данных покрытий наряду с контрастными покрытиями (сочетаниями гидрофобных и гидрофильных) позволяет эффективно отводить конденсат из областей с капельной конденсацией в область с пленочной конденсацией. Эти и другие методы позволяют получить существенное увеличение коэффициента теплоотдачи при конденсации пара.

В данной работе исследованы процессы конденсации на гидрофильной поверхности («голая» медь), гидрофобной поверхности (медь с тефлоновым покрытием), а также на поверхности с контрастной смачиваемостью. Наступающий и отступающий углы смачивания для гидрофобной поверхности составляют 127 и 85 градусов. Для гидрофильной пластины эти углы составляют 69 и 8 градусов.

Рабочий участок экспериментальной установки представляет собой плоский канал, с конденсатором – медной пластиной 100x18мм, через который пропускается водяной пар. Медная пластина охлаждалась при помощи термостатированной воды, в результате чего, на ней происходила конденсация пара. При помощи макрофотосъемки изучен процесс формирования и отвода капель конденсата с поверхности.

Эксперименты проводились при одном и том же расходе пара, но при различных углах наклона поверхности к горизонту. Измерения проводились при помощи термопар, расположенных в нескольких точках охлаждаемой пластины. Через прозрачное окно из стекла процесс конденсации исследовался визуально.

Построены зависимости тепловых потоков от угла наклона к горизонту для разных типов поверхностей (см. рис. 1). Установлено, что эффективность конденсации на гидрофобной поверхности существенно выше, чем на гидрофильной, в особенности для малых углов наклона рабочей поверхности. Конденсация на поверхности с контрастной смачиваемостью (см. рис. 2) имеет схожую эффективность теплообмена с гидрофобной поверхностью.

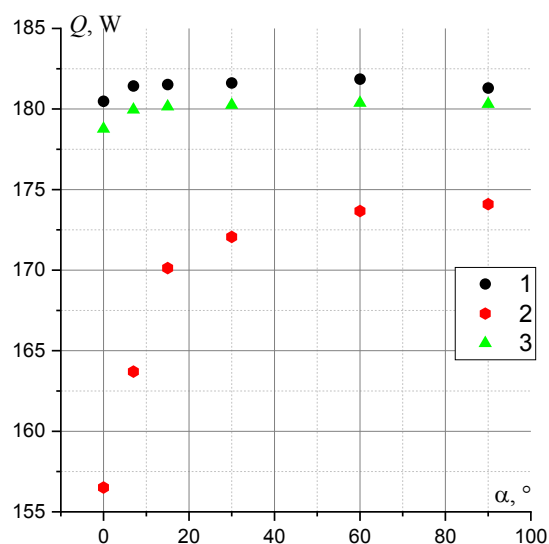


Рис. 1. Зависимость теплового потока от угла наклона для различных поверхностей. 1 – гидрофобная поверхность, 2 – гидрофильная поверхность, 3 – поверхность с контрастной смачиваемостью.



Рис. 2. Конденсация на поверхности с контрастной смачиваемостью

УДК 536.46

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГАЗОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.

Томский государственный университет,  
634061, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Целью настоящей работы является исследование особенностей распространения пламени угле-метано-воздушной смеси в закрытом цилиндрическом канале. В работе определяется влияние содержания метана в газе и массовой концентрации частиц угольной пыли в газозвеси на скорость распространения пламени.

Постановка задачи формулируется на основе подходов [1] с допущениями [2]. В отличие от работы [2] задача решается в двухмерной осесимметричной постановке. Уравнения математической модели записываются в цилиндрических координатах в консервативной форме. На боковой стенке и на торцах канала задаются условия непротекания.

Метод решения задачи основан на методах [3, 4]. Шаг разностной сетки по времени определялся условием устойчивости Куранта-Фридрихса.

На рис. 1–3 представлены примеры полученных результатов.

На рис.1 показаны распределения температуры газа при сгорании газозвеси угольной пыли с массовой концентрацией частиц  $0.2 \text{ кг/м}^3$ , радиусом частиц  $10 \text{ мкм}$ , объемной концентрацией метана в газе  $7\%$ .

На рис. 2 представлены результаты расчета для газозвеси угольной пыли с массовой концентрацией частиц  $0.1 \text{ кг/м}^3$ , радиуса частиц  $10 \text{ мкм}$ , объемной концентрацией метана в газе  $7\%$ .

На рис. 3 представлены результаты расчета для газозвеси угольной пыли с массовой концентрацией частиц  $0.2 \text{ кг/м}^3$ , радиуса частиц  $10 \text{ мкм}$ , объемной концентрацией метана в газе  $8\%$ .

Все рисунки построены в моменты времени  $2$  и  $4 \text{ мс}$ . Из анализа рисунков 1–3 можно сделать вывод, как о видимой скорости перемещения фронта горения газозвеси угольной пыли в зависимости от объемной доли метана и массовой концентрации частиц угольной пыли в смеси, так и о форме пламени на начальном этапе горения газозвеси.

Видимая скорость перемещения фронта пламени за интервал времени  $2\text{--}4 \text{ мс}$  составила для варианта (рис. 1) величину  $5.3 \text{ м/с}$ . Для варианта (рис. 2) видимая скорость перемещения фронта пламени составила  $8.2 \text{ м/с}$ . Для варианта (рис. 3) видимая скорость получилась равной  $7.2 \text{ м/с}$ .

Согласно результатам расчета смесь с большим содержанием метана воспламеняется быстрее, скорость ее горения выше на начальном этапе (рис 3). После того как пламя достигает боковых стенок, имеет место замедление скорости распространения фронта пламени по сравнению со смесью с меньшим содержанием метана и меньшей массовой концентрацией частиц (рис.2). Объяснением этому является конкурирующий характер реакций между окислителем и горючими компонентами смеси.

Из серии расчетов получена видимая скорость распространения пламени по длине цилиндрического канала в зависимости от состава смеси.

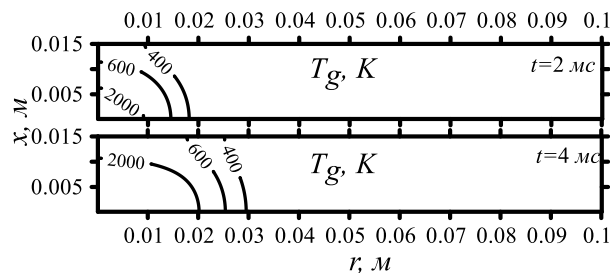


Рис. 1. Распределение температуры газа.  $m_p = 0.2 \text{ кг/м}^3$ ,  $r_p = 10 \text{ мкм}$ ,  $a_{vol} = 7\%$

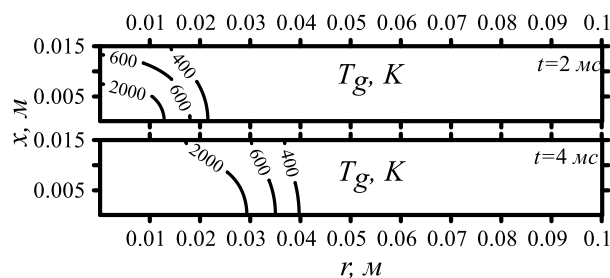


Рис. 2. Распределение температуры газа.  $m_p = 0.1 \text{ кг/м}^3$ ,  $r_p = 10 \text{ мкм}$ ,  $a_{vol} = 7\%$

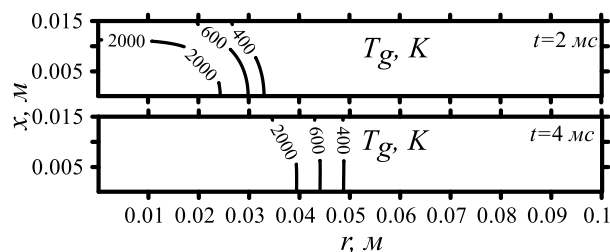


Рис. 3. Распределение температуры газа.  $m_p = 0.2 \text{ кг/м}^3$ ,  $r_p = 10 \text{ мкм}$ ,  $a_{vol} = 8\%$

### Список литературы:

1. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука. 1987.
2. Крайнов А. Ю., Моисеева К. М. Моделирование искрового зажигания бидисперсной аэрозвеси угольной пыли // ИФЖ. 2018. Т.91, №5. С. 1328–1334.
3. 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.
4. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной 'собственного' давления // ПММ. 1979. Т. 43, № 3. С. 500–510.

Работа поддержана Российским научным фондом  
(грант № 21-71-10034).

УДК 536.46+662.35

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ЗАРЯДА ИЗ ПОРОХА Н НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ

Моисеева К.М., Порязов В.А., Крайнов А.Ю.

Томский государственный университет,  
634061, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

В настоящей работе ставится задача на основе сопряженной модели горения твердого топлива исследовать нестационарное горение пороха Н при акустических колебаниях давления в камере сгорания газогенератора.

Акустические незатухающие колебания в камере сгорания зависят от формы камеры и заряда. В случае заряда цилиндрической формы помимо продольных колебаний возможно возникновение поперечных и тангенциальных акустических колебаний [1].

Было проведено расчетно-теоретическое исследование влияния радиальных акустических колебаний в поперечном сечении цилиндрического канала заряда на скорость горения. Сечение заряда представлено на рис. 1.

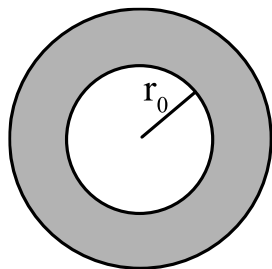
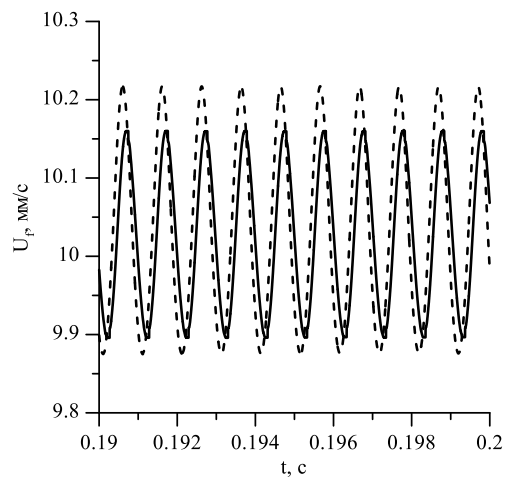


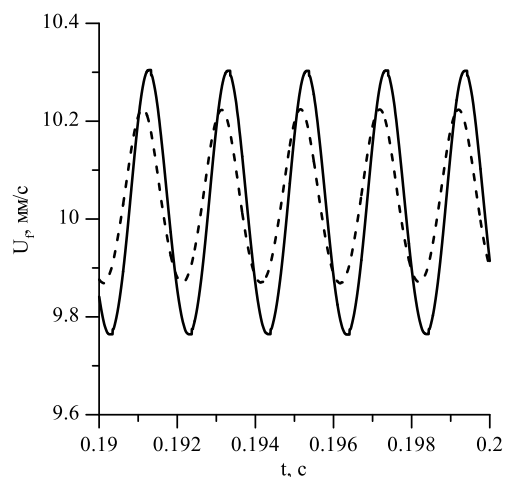
Рис. 1. Поперечное сечение заряда твердого топлива.  
 $r_0$  – поверхность горения.

Для моделирования горения пороха Н принята модель [2, 3]. Для моделирования течения газа в камере используются уравнения газовой динамики записанные в полярной системе координат. Предполагается, что в камере создано давление 100 атм. В окрестности центра канала возникло возмущение давления на 10 % выше, 110 атм. В расчетах варьировалась величина  $r_0$  в интервале от 1 м до 0.125 м. В качестве твердого топлива принят нитроглицериновый порох с характеристиками [2].

Результаты расчетов представлены на рис. 2. На рис. 2 представлены зависимости квазистационарной скорости, рассчитанной по формуле  $U_f = ap^v$  и нестационарной скорости в интервале времени 0.01 с на участке установившихся колебаний давления при среднем давлении 105 атм. и амплитудой у поверхности горения 3.5 атм. При частоте колебаний давления 500 Гц амплитуда изменения нестационарной скорости горения превышает амплитуду изменения скорости, рассчитанной по квазистационарной формуле (рис. 2). При частотах 1000 Гц и 2000 Гц амплитуда изменения нестационарной скорости горения меньше рассчитанной по квазистационарной формуле. Была построена зависимость максимальной и минимальной мгновенной скорости горения от частоты колебаний давления.



а)  $r_0 = 0.5$  м, 1000 Гц



б)  $r_0 = 1$  м, 500 Гц

Рис. 2. Изменение скорости горения от времени.  
Пунктирная линия – квазистационарная скорость горения,  
сплошная линия – нестационарная скорость горения

### Список литературы:

1. Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю. Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1979. 392 с.
2. Крайнов А. Ю., Порязов В. А. Численное моделирование погасания пороха Н при резком сбросе давления на основе сопряженной модели горения // ФГВ. 2015. Т. 51. № 6. С. 47–52.
3. Крайнов А.Ю., Порязов В.А. Численное моделирование нестационарного горения пороха при быстром росте давления на основе сопряженной модели горения // ИФЖ. 2022. Т. 95. № 1. С. 185–193.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания FSWM-2020-0036.

УДК 533.5

## ДИНАМИКА ПЛОСКОГО РАЗЛЕТА ГАЗА ПРИ НАНОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ ИСПАРЕНИИ В ГАЗ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Морозов А.А.<sup>1</sup>, Титарев В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> ФИЦ «Информатика и управления» РАН,  
119333, Россия, Москва, ул. Вавилова, 44/2

Лазерная абляция твердых тел наносекундными импульсами в фоновом газе широко используется для осаждения тонких многокомпонентных пленок, синтеза наночастиц, элементного анализа, обработки, чистки и структурирования поверхности. Исследования динамики разлета лазерного факела в фоновом газе важны для оптимизации процессов, связанных с этими различными применениями.

Динамика разлета лазерного факела в фоновом газе является предметом многочисленных численных исследований, как на основе решения уравнений сплошной среды, так и на основе кинетического моделирования на молекулярном уровне. Однако, несмотря на большое число работ в этой области, систематического исследования этого процесса не было.

Для точного решения этой задачи в данной работе использовались различные кинетические подходы: метод прямого статистического моделирования (ПСМ) Монте-Карло и решение уравнения Больцмана с оператором столкновений БГК [1].

Задача решается в одномерной плоской постановке, которая соответствует начальной стадии разлета лазерного факела. В течение длительности импульса  $\tau$  задается постоянный поток частиц с поверхности испарения. Для скоростей испаряющихся частиц задается полумаксвелловская функция распределения. Используется модель твердых сфер. Предполагается, что все возвращающиеся молекулы поглощаются на поверхности испарения.

Получены результаты для широкого диапазона параметров: давления фоновых газа, массы испаряемых и фоновых частиц, температуры и давления насыщенного пара на поверхности испарения, продолжительности испарения. Начальная стадия разлета (во время процесса испарения) анализируется на основе аналитического континуального решения классической задачи Римана о распаде произвольного разрыва, которое хорошо согласуется с результатами расчетов. На рис. 1 представлена типичные профили плотности в автомодельных координатах для следующих параметров: длительность испарения  $\tau = 10$  нс, давление насыщенного пара на поверхности 100 атм, температура поверхности 10000 К, фоновое давление 1000 Па, одинаковая масса испаренных и фоновых частиц 40 а.е.м. Проанализирована динамика расширения, установлены характерные времена и расстояния, определяющие основные этапы процесса расширения. Получены общие закономерности, описывающие динамику движения внешней и внутренней ударных волн и контактной поверхности, а также максимальную плотность испаряемых частиц и характерные температуры испаряемых и фоновых частиц в сжатом слое. В качестве

примера на рис. 2 представлены данные по временной эволюции максимальной температуры фоновых газа в сжатом слое в безразмерных координатах.

Полученные данные важны для построения полного теоретического описания временной эволюции слоя смешения при наносекундной лазерной абляции в фоновый газ низкого давления.

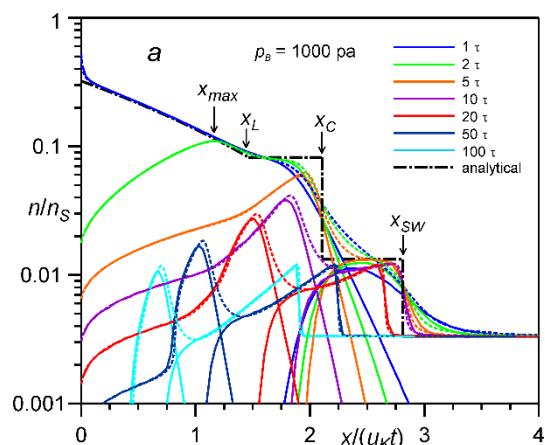


Рис. 1. Профили плотности смеси в автомодельных координатах для фоновых давлений 1000 Па.

Сплошные линии – расчет ПСМ, пунктир – решение модельного уравнения.

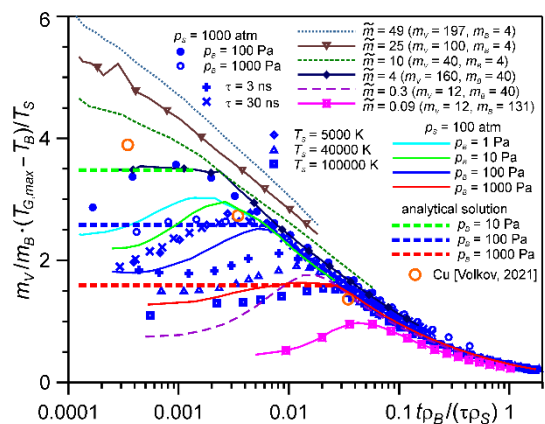


Рис. 2. Временная эволюция максимальной температуры фоновых газа в сжатом слое.

### Список литературы:

1. A. A. Morozov, V. A. Titarev. Numerical simulation of pulsed planar evaporation into background gas based on direct Monte Carlo simulation and solution of the BGK model kinetic equation. J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2119. P. 012116.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-11-00078) с использованием суперкомпьютеров МСЦ РАН.

УДК 536.24

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ТОНКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ, НЕОДНОРОДНО НАГРЕВАЕМОМ СО СТОРОНЫ ПОДЛОЖКИ

Мунгалов А.С., Кочкин Д.Ю.

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

Локальный нагрев тонких слоев жидкости способствует возникновению потоков и поверхностных деформаций, вызванных термокапиллярным эффектом, который создает поверхностные касательные напряжения. Эффект Марангони в тонких слоях жидкости существенно влияет на тепло- и массообмен и может приводить к разрыву пленки. В случае конвекции Марангони в системах со свободной границей обнаружено, что существует множество видов неустойчивости. Термокапиллярные явления в слоях жидкости активно изучаются на протяжении последних десятилетий, однако по-прежнему остаются малоизученными.

Целью данной работы является численное исследование деформаций свободной поверхности в тонком слое жидкости, нагреваемом со стороны подложки. Кроме того, данные моделирования сравниваются с экспериментом, представленном в работе [1]. Моделирование проводилось с помощью пакета Ansys fluent. Для моделирования межфазной границы использовался метод VOF (volume of fluid). Расчетная область представляет собой прямоугольник размером  $20 \times 3$  мм<sup>2</sup>, толщина слоя жидкости 1,25 мм. Количество конечных элементов расчетной сетки составляло 201742, число узлов: 181359. Вблизи свободной поверхности произведено сгущение для того, чтобы зафиксировать деформации меньше 1 мкм. Область нагрева расположена снизу, примыкает к левой границе и имеет длину 5 мм, на ней задавалась зависимость температуры от времени. На всей нижней, а также на правой границах задано условие прилипания и непротекания. На верхней границе задавалось условие фиксированного давления. На левой границе прямоугольной области поставлено условие симметрии. В модель включались линейные зависимости плотности жидкости, а также поверхностного натяжения от температуры.

Связь между полем скорости и давления реализуется с помощью алгоритма SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Для решения уравнения неразрывности использовалась схема PRESTO! (PREssure STaggering Option). Для оценки градиентов использовался алгоритм Least Squares Cell Based. Дискретизация конвективных членов производилась с помощью схемы Second Order Upwind. Схема дискретизации Geo-reconstruction использовалась для аппроксимации границы раздела. Алгоритм непрерывной поверхностной силы (CSF) был использован для моделирования поверхностного натяжения.

Результат численного моделирования представлен на рис. 1. На рис. 2 представлены экспериментальные данные, полученные в работе [1]. Для моделирования были проведены следующие упрощения: во-первых, решалась двумерная осесимметричная задача (в эксперименте [1] нагреватель имел квадратную форму),

во-вторых, размер области был ограничен по сравнению с экспериментом. Данные упрощения вызваны недостатком вычислительных мощностей, однако задачи имеют схожую конфигурацию для качественного сравнения с экспериментом.

Несмотря на упрощения, данные моделирования хорошо согласуются с полученной экспериментальной зависимостью, однако влияние правой стенки ощутимо. В эксперименте жидкость свободно растекалась от центра области, не вызывая возмущений на границе. В случае моделирования уровень жидкости в правой части расчетной области заметно увеличился. Это связано с уменьшением размера кюветы, с равенством нулю нормальной компоненты скорости на периферии, а также с увеличением объема жидкости из-за термического расширения.

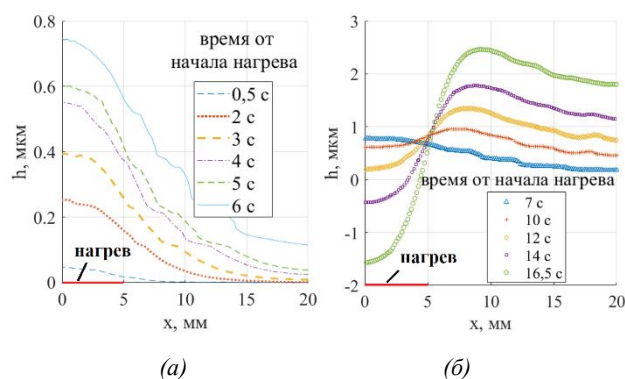


Рис. 1. Расчетные профили деформаций, вызванные термическим расширением (а), а также термокапиллярным эффектом (б).

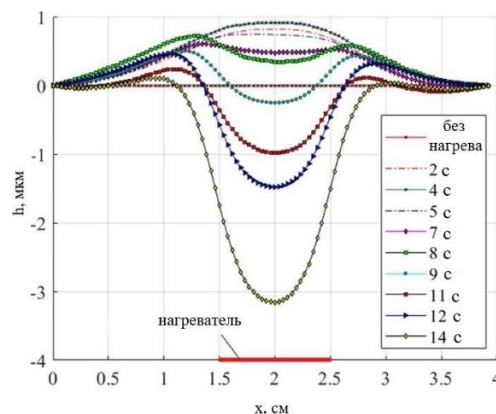


Рис. 2. Экспериментальный профиль деформаций свободной поверхности. Толщина слоя – 1,25 мм, мощность нагрева – 5 Вт.

### Список литературы:

1. Kochkin D.Y., Mungalov A.S., Zaitsev D.V., Kabov O.A., Use of the reflective background oriented schlieren technique to measure free surface deformations in a thin liquid layer non-uniformly heated from below// Exp. Therm. Fluid Sci. 2022. V 133, 110576.



УДК 532.5, 531.7

## ВЛИЯНИЕ ИМПАКТНОГО ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ПАРАМЕТРЫ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

Назаров А.Д., Серов А.Ф., Миськив Н.Б., Мамонов В.Н.

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

В работе представлены результаты экспериментального исследования поведения локальных и усредненных значений толщины пленки жидкости, осажденной на вертикальную поверхность из многоструйного импульсного импактного газокapельного потока. Измерения локальной толщины пленки были получены оригинальным многоканальным емкостным измерителем толщины пленки жидкости. Показано, что при заданной скважности импульсного капельного потока жидкости и под воздействием определённого удельного расхода спутного потока газа, на поверхности теплообменника образуется жидкостное покрытие двухтипов:

- однородная по всей поверхности ламинарная пленка жидкости,
- отдельные области пленочных образований с ревулентами и колониями капель жидкости.

Экспериментальный стенд состоит из источника многоструйного газокapельного потока и теплообменника, расположенные на расстоянии 0,24 м напротив друг друга вертикально относительно горизонта [1]. Управляемый источник (матрица 4×4 форсунок с электромагнитным управлением) формирует импульсный капельный поток длительностью  $T_i=(100, 50, 25, 10, 4)$  мс и периодом открытия  $T=200$  мс, что соответствует скважности  $Q=\frac{T}{T_i}$ : 2, 4, 8, 20 и 50. Области капель движутся в стационарном спутном воздушном потоке, средняя скорость которого в данном исследовании  $V_a=8$  м/с. Теплообменник имеет размеры рабочей поверхности 140×140 мм, представляет собой медную пластину толщиной 25 мм. В опытах было реализовано граничное условие  $T_w=\text{const}$  (70°C). Рабочей жидкостью газокapельного потока являлась дистиллированная вода. Температура жидкости 25°C.

Для наблюдения за процессом образования пристенной пленки на поверхности теплообменника был определен режим, когда импактный многоструйный газокapельный поток формирует пленку жидкости на части поверхности. Выбранный режим позволяет наблюдать гидродинамику и теплообмен в центральной и периферийной областях пристенного течения. В качестве основных методов регистрации гидродинамических процессов применялись оптические регистраторы (быстродействующие фото- и видео камеры) и диэлькометрический регистратор локальной толщины пленки авторской разработки [2].

Анализ видео наблюдений и данных о толщине пленки показал, что при расходе жидкой фазы до 5 гр/с на поверхности теплообменника нет однородного пленочного покрытия, спутный воздушный поток способствует образованию множества областей тонкой пленки. В диапазоне расходов жидкости от 5 до 10 гр/с ( $T_i=25-50$  мс) однородное пленочное по-

крытие проявляет устойчивость без импактной воздушной струи, но разрушается при ее наличии. При расходе выше 10 гр/с, что соответствует длительности открытия клапанов  $t>50$  мс, на поверхности теплообменника наблюдается пленочное течение как без спутного воздушного потока, так и с ним. По данным диэлькометрического метода при всех режимах на поверхности пленки наблюдаются волны амплитудой порядка 10 мкм, поэтому можно сказать, что течение пленки является ламинарным.

По результатам сравнения средней толщины пленки без спутного и со спутным потоком (см. рис.1) можно сделать вывод, что спутный воздушный поток уменьшает среднюю толщину пленки жидкости за счет увеличения скорости потока жидкости.

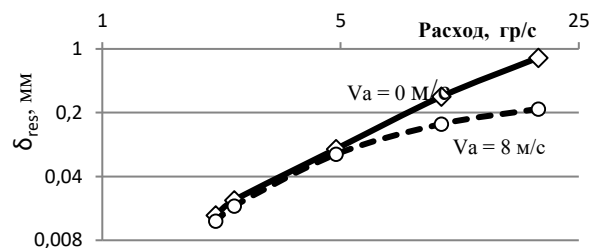


Рис. 1. Средняя толщины пленки жидкости без спутного воздушного потока ( $V=0$  м/с) и со спутным потоком скоростью  $V_a=8$  м/с.

Импактная воздушная струя увеличивает скорость растекания жидкости, тем самым утончая пленку и увеличивая площадь жидкости на поверхности. По измеренным данным средней толщины и скорости движения пленки, и по формуле числа Рейнольдса  $Re=V \cdot \delta_{res} / \mu$ , (где  $V$  – скорость пленки;  $\delta_{res}$  – средняя толщина пленки;  $\mu$  – кинематическая вязкость воды при температуре 70°C), соответствующее этому течению число Рейнольдса, которое в зависимости от расхода, имеет диапазон  $Re=0-20$ .

### Список литературы:

1. Terekhov V.I., Karpov P.N., Nazarov A.D., Serov A.F. Unsteady heat transfer at impinging of a single spray pulse with various durations // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. 158. 120057.
2. Чиннов Е.А., Назаров А.Д., Серов А.Ф. Волновые характеристики нагреваемой пленки при воздействии внешних возмущений // ТИА. 2008. Т 15. № 4, С. 71–79.

УДК 533.6; 536.24; 621.45.038

**АЭРОДИНАМИКА И ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИСТЕННОЙ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСЫ, ВДУВАЕМОЙ ЧЕРЕЗ НАКЛОННЫЕ ОТВЕРСТИЯ В ПОПЕРЕЧНУЮ ТРАНШЕЮ****Назаров Н.А., Пахомов М.А., Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.И.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1.

В настоящее время, в связи с постоянным увеличением характеристик турбореактивных двигателей, растет и их внутренняя температура при сгорании газа. В связи с этим, требуется улучшение защиты поверхностей лопаток турбин, камер сгорания и т.п. Одним из способов является создание тонкой газовой завесы вдоль поверхности. В основном, для создания завесы используют наклонные струи. При такой подаче возникает отрыв струй от поверхности, а также образуются CRVP (Counter-Rotating Vortex Pair), быстро смешивающие струи с основным потоком. Это негативно сказывается на эффективности охлаждения. Одним из способов уменьшить отрыв пристенного вторичного потока и CRVP, является вдув через отверстия в поперечной траншее [1]. При такой конфигурации заметно усложняется процесс течения, а эффективность охлаждения возрастает до 3х раз. В связи с этим данная работа была посвящена исследованию аэродинамики и тепловой эффективности пристенной газовой завесы, вдуваемой через наклонные отверстия в поперечную траншею.

Для исследования аэродинамики использовался измерительный комплекс PIV. Импульсный лазер Beamtech Vlite-200 с длительностью импульса 6-8нс и максимальной энергией излучения 200 мДж использовался как источник излучения. Для регистрации изображений применялась цифровая камера ImpeX GEV-B2020M-TF000 с матрицей 2048×2048 пикселей. С помощью синхронизатора получалась пара изображений с временем между кадрами около 14 мкс. Изображения записывались на жёсткий диск компьютера. Для получения поля скоростей изображения разбивались на расчетные области  $dx \cdot dy$  и каждая область рассчитывалась отдельно. Для обработки изображений и нахождения скорости в расчетной области использовался кросскорреляционный метод с подпиксельной интерполяцией для каждого вектора скорости и фильтрацией векторов по отношению сигнал/шум и медианным фильтром и интерполяции векторного поля. Для тепловых измерений был применен тепловизор Testo с разрешением 1280×800 пикселей. Обработка данных теплообмена происходила с помощью собственных программ, написанных на C++ и Python.

Все эксперименты были проведены в прямоугольном канале с поперечным сечением 150×20 мм (Z×H) для однорядной системы из трех отверстий диаметром  $d=3.2$  мм расположенных под углом  $\alpha=30^\circ$  при отсутствии и наличии установленной поперечной траншеи. Центральное отверстие располагалось на оси канала. Расстояние между осями соседних отверстий составляло  $Z=10$  мм. Глубина траншеи принимала значения  $h=1, 2, 3$  и 5 мм и ее ширина была фиксированной  $w=6,4$  мм. Длина подводящих трубок для подачи вторичного течения была равна  $l=160$  мм ( $l/d = 50$ ). Рас-

стояние  $x$  отсчитывалось от подветренной кромки отверстия или стенки траншеи, а поперечное расстояние  $z$  – от оси центрального (второго) отверстия.

Средняя скорость основного потока составляла  $U_1=10$  м/с вторичного течения –  $U_2=6,9-20,7$  м/с, параметр вдува  $m=\rho_2 U_2 / \rho_1 U_1=0,63-1,88$  и число Рейнольдса, определенные по параметрам вторичного потока,  $Re_2=U_2 d / \nu_2=(1,2-3,7) \times 10^3$ . Профили скорости основного течения перед входом в измерительный участок соответствовали гидродинамически полностью развитому течению. Для исследования тепловой эффективности пленочного охлаждения использовалась обратная схема: основной поток холодный, а вторичный – нагретый. Такой способ широко распространен при проведении модельных экспериментов по исследованию тепловой эффективности пристенных газовых завес [2–4].

Представлены результаты экспериментального исследования структуры течения и теплообмена в пристенной газовой завесе, вдуваемой через наклонные отверстия в поперечную к потоку траншею. Для структуры течения измерены продольная  $U$  и поперечная  $V$  осредненные компоненты скорости и их пульсации, рейнольдсовы напряжения,  $z$  компонента завихренности  $w_z$ , двумерные усредненные  $Q$  и  $\lambda$  критерии на поверхностях XY на оси струй и между струями. В результате измерений, для траншейного случая получены меньшие значения критериев  $Q$  и  $\lambda$ , а также уменьшается угол наклона между струей и поверхностью, т.е. струя «прижимается» к защищаемой поверхности.

В работе также были проведены измерения тепловой эффективности газовой завесы. Ее значение при вдуве через отверстия в траншею значительно превышает соответствующую величину для классической подачи пристенного охладителя через круглые отверстия. Для случая вдува в траншею для экспериментальных данных характерным является незначительное влияние параметра вдува на тепловую эффективность пристенной завесы для всех исследованных в работе траншей. Максимальное увеличение тепловой эффективности достигается для траншеи глубиной  $h/d=0,94$ .

## Список литературы:

1. Bunker R.S. A review of shaped hole turbine film cooling technology // ASME J. Heat Transfer. 2005. Vol. 127. P. 441–453.
2. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
3. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат. 1985. 320 с.
4. Han J.C., Dutta S., Ekkad S. Gas turbine heat transfer and cooling technology. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton. 2012.

*Работа поддержана РНФ (грант № 19-79-30075).*

УДК 661.878

**ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАНОДИСПЕРСНОГО КУБИЧЕСКОГО КАРБИДА ВОЛЬФРАМА, СИНТЕЗИРОВАННОГО ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ****Насырбаев А.**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Твердосплавные материалы известны уже многие десятилетия благодаря сочетанию высокой механической прочности и твердости, что обуславливает их широкое применение в различных областях промышленности, в том числе в металлообработке, производстве абразивного, режущего инструмента, износостойких деталей и узлов [1, 2]. Среди них особо выделяются сплавы на основе карбидов вольфрама. Наиболее распространенными из них являются соединения карбида вольфрама и кобальта (WC-Co), характеризующиеся повышенной износостойкостью, высокой твердостью и температурной стабильностью [3].

Одним из возможных путей повышения физико-механических свойств объемных керамических материалов на основе WC может быть использование кубического карбида вольфрама (WC<sub>1-x</sub>) вместо широко распространенных гексагональных фаз (WC и W<sub>2</sub>C). Однако ключевым препятствием для такого рода исследований является проблема получения кубического карбида вольфрама в виде материала, пригодного для дальнейшего прессования.

В данной работе дисперсный WC<sub>1-x</sub> был получен методом прямого плазмодинамического синтеза в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе. Синтез продукта осуществлялся в гиперскоростной струе электроразрядной плазмы, генерируемой КМПУ с графитовыми электродами [4].

Для определения оптимальных режимов спекания керамики на основе WC<sub>1-x</sub> в настоящей работе исследована температурная стабильность дисперсных продуктов при отжиге в окислительной атмосфере, инертной атмосфере и в вакууме. Для этих целей был проведен как прямой отжиг, так и метод дифференциального термического анализа (ДТА), реализованный с помощью Netzsch STA 449F3 Jupiter с возможностью измерения изменения массы, теплового воздействия и ионных токов различных газов. Методами термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) построены соответствующие кривые. Исследования ДТА проводились в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Pt кюветы при скорости нагрева 10°C/мин в воздухе, аргоне и азоте. Процесс прямого отжига проводили в атмосферной печи P310 Nabertherm при скорости нагрева 10°C/мин. Время выдержки при необходимой максимальной температуре составляло 1 час.

Для определения фазового состава продуктов синтеза был проведен рентгенофазовый анализ (РФА) методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Shimadzu XRD 7000. Для исследования морфологии и размера частиц синтезированных порошков использовался метод сканирующей электронной микроскопии (SEM) на микроскопе Hitachi TM 3000, а также методом просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) на микроскопе Phillips CM 12.

По результатам РФА анализа было определено, что в продукте плазмодинамического синтеза преимущественно содержится фаза кубического карбида вольфрама (до 95%). Совокупность ТЕМ-изображений показало, что частицы имеют структуру «ядро-оболочка», где WC<sub>1-x</sub> является ядром, покрытое оболочкой из кристаллического графита.

Проведение отжига в воздушной атмосфере показало, что начало окисления происходит при температуре 500 °С, которое характеризуется появлением значительного количества фазы орторомбического оксида вольфрама (WO<sub>3</sub>). Это подтверждается максимальным выделением CO<sub>2</sub> на интервале 500–555 °С по данным ДТА анализа, когда начинают гореть оболочные структуры из кристаллического углерода. Начиная с температуры ~550 °С наблюдается резкий рост массы образца за счет окисления частиц WC<sub>1-x</sub> характерной морфологии. Полный переход WC<sub>1-x</sub>→WO<sub>3</sub> завершается при 700 °С

Термический анализ в азотной и аргонной атмосферах продемонстрировал изменение структуры продукта за счет содержания в газах небольших примесей кислорода, что приводит к локальному окислению материала. В связи с этим был проведен отжиг в вакууме, при котором было обнаружено, что до температуры в 600 °С не происходит значительных изменений в составе продукта. Однако повышение температуры влечет за собой повышение интенсивностей гексагональной фазы WC, что говорит о наличии фазового перехода WC<sub>1-x</sub>→WC.

Проведен комплексный анализ термостойкости дисперсного кубического карбида вольфрама в различных газовых средах и в вакууме. Продукт на основе WC<sub>1-x</sub> проявляет стойкость до 500 °С на воздухе, а затем полностью окисляется до WO<sub>3</sub> при 700 °С. Наоборот, значительное сопротивление WC<sub>1-x</sub> проявляется до 1200–1500 °С в вакууме, а также в аргоне и воздухе. Разрушение углеродных оболочек и матрицы приводит к окислению WC<sub>1-x</sub>→WO<sub>3</sub> при нагревании на воздухе и фазовому переходу WC<sub>1-x</sub>→WC при нагревании в вакууме.

## Список литературы:

1. Eriksson M., Radwan M., Shen Z. Spark plasma sintering of WC, cemented carbide and functional graded materials //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2013. Т. 36. С. 31–37.
2. Zhu T. et al. Oscillatory pressure sintering: A new method for preparing WC-Co cemented carbides //Journal of Alloys and Compounds. 2020. Т. 816. С. 152521.
3. Lee J. H. et al. Mechanical properties and microstructural evolution of WC-binderless and WC-Co hard materials by the heat treatment process //Journal of Alloys and Compounds. 2019. Т. 786. С. 1–10.
4. Pak A. et al. Synthesis of ultrafine cubic tungsten carbide in a discharge plasma jet //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2015. Т. 48. С. 51–55.

УДК 661.689

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

Насырбаев А.<sup>1</sup>, Никитин Д.С.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30<sup>2</sup> Тюменский государственный университет,  
625003, Россия, Тюмень, ул. Володарского, 6

Карбид кремния SiC широко применяется в двигателестроении, машиностроении, химической промышленности, металлургии, ядерной энергетике и других областях благодаря совокупности уникальных физических характеристик, таких как сверхтвердость (30 ГПа), высокая термостойкость, стойкость к химически агрессивным средам и к радиационному излучению. [1].

Известно, что наноразмерные частицы SiC используются для создания наноструктурированной керамики и в качестве армирующего материала для повышения износостойкости, твердости, прочности, вязкости разрушения и уменьшения трения [2]. Таким образом, проблема синтеза наноразмерного карбида кремния, а также получение на его основе наноструктурированной керамики, является актуальной задачей.

Одним из возможных путей реализации экстремальных энергетических параметров, необходимых для соединения атомов кремния и углерода, является прямой плазмодинамический синтез в сверхзвуковой струе кремний-углеродной электроразрядной плазмы [3]. Данный метод позволяет получать дисперсный продукт с выходом фазы кубического карбида кремния ( $\beta$ -SiC) до 99%. Синтезированный порошок характеризуется монокристаллической структурой частиц и их средним размером 70 нм.

Синтез керамических материалов осуществлялся с помощью установки искрового плазменного спекания на установке SPS 10-4 Thermal Technology в вакуумной среде со следующими параметрами спекания:  $T=1750^{\circ}\text{C}$ ,  $p=60$  МПа, скорость нагрева –  $100^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , время выдержки – 10 мин. Основным преимуществом такого метода является высокая скорость спекания, которая обеспечивается одновременным приложением давления и импульсного тока.

В работе проведены две серии экспериментов, в которых анализировалось влияние дисперсности используемого прекурсора, а также влияние спекающих добавок на характеристики керамических продуктов. В качестве прекурсоров выступали коммерческий порошок карбида кремния (SiC<sub>ком</sub>) (F-1200) и ультрадисперсный порошок SiC (SiC<sub>плазм</sub>), полученный плазмодинамическим синтезом. Ввиду наличия сильной ковалентной связи с низким коэффициентом самодиффузии спекание керамики из карбида кремния затруднено, что приводит к необходимости использования спекающих добавок. Спекающими добавками выступали две смеси безоксидная – смесь алюминия, бора и углерода, а также оксидная – оксиды алюминия и иттрия [4, 5].

Для определения фазового состава продуктов спекания был проведен рентгенофазовый анализ (РФА)

методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Shimadzu XRD 7000. Твердость по Виккерсу определялась с использованием твердомера Galileo (ISOSCAN HV2 OD). Исследование теплопроводности полученных керамических образцов осуществлялось методом лазерной вспышки на анализаторе DLF 1200 (TA Instruments).

Согласно результатам РФА керамика, полученная из SiC<sub>плазм</sub> преимущественно состоит из  $\beta$ -SiC, что говорит об отсутствии фазового перехода  $\beta \rightarrow \alpha$ . Керамика, полученная на основе ультрадисперсного  $\beta$ -SiC характеризуется большей плотностью и твердостью, относительно керамики из SiC<sub>ком</sub>.

Применение спекающих добавок позволяет значительно повысить характеристики керамики за счет получения более плотной структуры с меньшим размером зерен. В результате исследования было определено, что наиболее высокие характеристики керамики получены при применении SiC<sub>плазм</sub> совместно с добавками алюминия, бора и углерода. Для данного образца получены следующие значения: плотности  $\rho=3,12$  г/см<sup>3</sup>, твердости  $H_{cp}=25,9 \pm 0,3$  ГПа, коэффициента теплопроводности  $\lambda=73$  Вт/м·К.

Результатом настоящей работы является получение керамических образцов на основе карбида кремния. В работе показаны возможности увеличения характеристик керамических продуктов за счет уменьшения дисперсности используемого порошка, а также за счет применения спекающих добавок.

### Список литературы:

1. Андриевский Р. А. Наноразмерный карбид кремния: синтез, структура, свойства //Успехи химии. 2009. Т. 78. №. 9. С. 889–900.
2. Parvizi S. et al. Synergistic effects of graphite nano-flakes and sub-micron SiC particles on the characteristics of spark plasma sintered ZrB<sub>2</sub> nanocomposites //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2018. Т. 75. С. 10–17.
3. Sivkov A. et al. Optimization of plasma dynamic synthesis of ultradispersed silicon carbide and obtaining SPS ceramics on its basis //International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2019. Т. 79. С. 123–130.
4. Cho K. S., Munir Z. A., Lee H. K. Microstructure of spark plasma sintered silicon carbide with Al-BC. – 2008.
5. Перевислов С.Н. Материалы на основе карбида и нитрида кремния с оксидными активизирующими добавками для изделий конструкционного назначения / Дис. докт. техн. наук: 05.17.11. – 2017.

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского научного фонда  
(грант № 21-73-10245).*

УДК 532.54

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ

Наумов И.В., Шарифуллин Б.Р., Штерн В.Н.

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

Исследование нелинейных эффектов и интенсификации тепломассообмена вихревого течения в системе двух несмешиваемых жидкостей, моделирующей вихревые биореакторы, имеет большой практический и фундаментальный интерес для оптимизации конструкций и методов управления вихревыми биореакторами [1–3]. Недавние экспериментальные исследования показали, что при увеличении интенсивности вихревого движения возникает проскальзывания на границе раздела закрученных потоков двух несмешиваемых жидкостей, и изменяется топология потока по сравнению с той, которую предсказывает численный расчет с использованием условия непрерывности скорости и касательных напряжений на границе раздела [2, 3]. В данной работе было подробно изучено течение в окрестности границы раздела.

Эксперименты проводились в вертикальном цилиндрическом контейнере ( $R=47$  мм,  $h=2R$ ) с верхним вращающимся диском (см. рис. 1(a)). Были измерены радиальная и азимутальная компоненты скорости в горизонтальных поперечных сечениях с использованием метода цифровой трассерной визуализации (PIV). Измерения проводились в нескольких сечениях: на расстоянии 1–20 мм от границы раздела в верхней и в нижней жидкости. В качестве верхней жидкости было использовано подсолнечное масло (o), а в качестве нижней жидкости: 80% раствор глицерина (g). При температуре 22,6°C плотности и кинематические вязкости жидкостей составляли:  $\rho_o=914,7$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_g=1237$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu_o=49,11$  мм<sup>2</sup>/с,  $\nu_g=61,3$  мм<sup>2</sup>/с. Высота слоя верхней жидкости  $h_o=1R$ , высота слоя нижней жидкости  $h_g=1R$ . Интенсивность вихревого движения, генерируемого вращающимся диском, характеризуется числом Рейнольдса:  $Re=\omega R^2/\nu_o$ , где  $\omega$  – угловая скорость вращения диска. На рисунке 1(б) и 1(в) показаны максимальные значения окружной ( $V_{am}$ ) и радиальной ( $V_{rm}$ ) скорости, полученные в различных сечениях (где  $z=0$  – граница раздела). Квадратами указаны скорости над границей раздела (u), а треугольниками – под границей раздела (l).

Было получено, что скорость вращения непрерывна на границе раздела (см. рис. 1(б)) тогда как радиальная компонента испытывает скачок. Аппроксимацией экспериментальных данных показано, что в верхней жидкости развивается пограничный слой, где величина радиальной скорости уменьшается до малого значения или нуля вблизи границы раздела, при этом поток остается сходящимся к оси. В тоже время пограничный слой отсутствует в нижней жидкости, которая расходится от оси, а радиальная скорость почти не зависит от  $z$  вблизи границы раздела (см. рис. 1(в)). Эти различные граничные условия на границе раздела развиваются из-за скачков плотности и вязкости жидкости и вращения как верхней, так и нижней жидкостей.

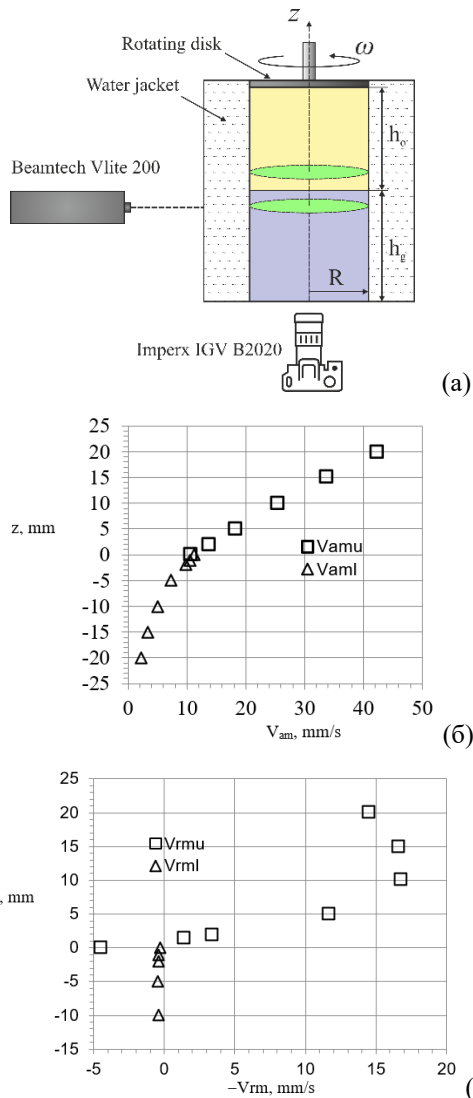


Рис. 1. Схема установки (а), максимальное значение окружной скорости (б), максимальное значение радиальной скорости (в) вблизи границы раздела при  $Re=300$ .

### Список литературы:

1. Naumov I.V., Herrada M.A., Sharifullin B.R., Shtern V.N. Hysteretic growth and decay of a waterspout column // Phys. Rev. Fluids. 2018. V.3. 024701.
2. Naumov I.V., Herrada M.A., Sharifullin B., Shtern V.N. Slip at the interface of a two-fluid swirling flow // Phys. Fluids. 2018. V.30. 074101.
3. Naumov I.V., Glavniy V.G., Sharifullin B., Shtern V.N. Multi-cellular pattern of a two-fluid swirling flow in a closed cylinder // J. Physics: Conf. Series. 2018. V.1105. 012030.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-19-00083.

УДК 539.1

## ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

**Нигматулин Б.И., Пивоваров В.А.**

Институт проблем энергетики,  
121099, Москва, Малый Каковинский пер., д.6 стр.1

В докладе представлена краткая информация о результатах разработки и эксплуатации реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ), история которых в нашей стране насчитывает семь десятилетий, начиная с пуска теплофизического стенда со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ) в 1951 г. Речь идет о 14 реакторах, включая один реактор с ртутным теплоносителем (БР-2) и 13 ЯЭУ с СВТ для АПЛ и наземных прототипов, а также двух экспериментальных петель со свинцовым теплоносителем (СТ) и СВТ на реакторе БОР-60.

В числе основных и общих проблем реакторов с ТЖМТ в докладе отмечены:

- коррозионная агрессивность ТЖМТ по отношению к ферритно-мартенситным и аустенитным сталям – высокая скорость жидкометаллической коррозии (ЖМК) при отсутствии эффективных коррозионных покрытий, ненадежности и временном характере коррозионной защиты с помощью оксидных пленок;
- несостоятельность самой концепции защиты от ЖМК с помощью кислородной коррозии, обеспечиваемой за счет подачи кислорода в теплоноситель с угрозой (не раз реализовавшейся на практике) зашлаковки ТЖМТ и контура циркуляции оксидами свинца и продуктами кислородной коррозии конструкционных материалов;
- высокая температура кипения и высокая плотность ТЖМТ, создающие предпосылки для беспрепятственного повышения температуры теплоносителя до температуры плавления стали в аварийной ситуации и для эффективной сепарации расплавленной стали и поглотителей от топлива в тяжелом теплоносителе, сопровождающейся вводом большой положительной реактивности с угрозой СЦР;
- высокая плотность ТЖМТ, создающая проблемы с удержанием ТВС от всплытия, с быстрым вводом РО СУЗ по сигналу АЗ, с обеспечением сейсмической прочности корпуса и внутрикорпусного оборудования;
- сильная зависимость скорости ЖМК и кислородной коррозии от уровня напряжений в стали, температуры и скорости теплоносителя, содержания в нем кислорода, от термоциклирования и механического истирания (фреттинга) при крайней ограниченности или полном отсутствии экспериментальных данных о коррозионной стойкости используемых сталей в зависимости от перечисленных выше факторов;
- преимущественно язвенный характер коррозионных повреждений конструкционных материалов в ТЖМТ, как результат одновременного воздействия ЖМК и кислородной коррозии в реальных условиях эксплуатации (напряжения, термоциклирование, фреттинг-износ), отсутствие экспериментальных данных о скорости роста количества и глубины язв для этих материалов;
- недостаточность и непредставительность традиционных коррозионных испытаний ненагруженных образцов сталей и макетов ТВС в ТЖМТ с оценкой коррозионных повреждений по толщине оксидной пленки и проведением промежуточных водородных очисток, химически разрушающих эту пленку;
- деградация механических свойств сталей (снижение длительной и циклической прочности, трещиностойкости, ускорение ползучести, жидкометаллическое охрупчивание) под воздействием ТЖМТ;
- отсутствие представительных статистически обоснованных экспериментальных данных о механических свойствах конструкционных материалах в среде ТЖМТ в прогнозируемом диапазоне изменения эксплуатационных параметров (температур, напряжений, скоростей теплоносителя и содержания в нем кислорода), полученных в испытаниях, продолжительность которых была бы достаточна для подтверждения работоспособности материала в течение срока службы оборудования или трубопроводов;
- несовместимость хрупкого быстро распухающего нитридного топлива с ТЖМТ из-за жесткого механического контакта «топлива-оболочка» через фрагменты (крошки) топлива в газовом зазоре уже на ранних этапах облучения (сразу после пуска реактора), приводящего к появления высоких напряжений в оболочке и, как следствие, к резкому увеличению скорости сплошной кислородной и локальной жидкометаллической коррозии со стороны теплоносителя, к многократному снижению длительной прочности (времени до разрушения) и ускорению ползучести оболочки;
- недостаточность контроля качества теплоносителя с помощью единственного контролируемого параметра – термодинамической активности (ТДА) кислорода, поддержание регламентного значения которого, как показали испытания и опыт эксплуатации ЯЭУ и стендов с ТЖМТ, не обеспечивает ограничения коррозии в заданных пределах и не гарантирует от зашлаковки контура циркуляции оксидами свинца и продуктами кислородной коррозии;
- проблемы с поддержанием качества большого объема ТЖМТ с помощью периодической водородной очистки, воздействующей только на ок-

сиды свинца, и непрерывной фильтрации теплоносителя при наличии застойных зон с низкими скоростями циркуляции и при отсутствии представительного оперативного контроля за содержанием нерастворенных примесей в нем.

Отдельную проблему представляет гигантский (больше, чем у РБМК) металло-бетонный корпус реактора в проекте БРЕСТ-ОД-300, пронизанный каналами сушки и многометровыми трещинами, образующимися при разогреве бетона, неспособный обеспечить локализующую функцию ни для теплоносителя, ни для газа.

Обоснование безопасности РУ с ТЖМТ, включающее в себя прочностные и теплофизические расчеты, выполненное без учета фактических результатов коррозионных испытаний конструкционных материалов в условиях, близких к условиям эксплуатации, при отсутствии надежных, статистически обоснованных данных о механических свойствах этих материалов не только не консервативно, но и совершенно недостоверно. Поэтому перспективы любого проекта РУ с ТЖМТ связаны, прежде всего, с получением указанной выше информации. Соответственно, первоочередными задачами при разработке проекта такого реактора являются:

- проведение длительных коррозионных испытаний нагруженных образцов сталей в диапазоне температур, напряжений, скоростей ТЖМТ и концентраций кислорода в нем, характерных для условий эксплуатации используемых материалов. Получение данных о скорости окисления, скорости роста количества и глубины язв в зависимости от указанных выше параметров;
- получение достоверных, статистически обоснованных данных о механических свойствах сталей в ТЖМТ, включая кратковременные механические свойства, характеристики длительной и циклической прочности, в соответствии с требованиями СПиР-СТ и Приложения 2 НП-089-15. Эти данные должны быть получены при испытаниях, продолжительность и условия которых достаточны для подтверждения работоспособности материала в течение срока службы соответствующего элемента РУ.

Своевременное получение перечисленных выше данных могло бы предостеречь от безответственной выдачи необеспеченных векселей, а также предотвратить бесполезную трату времени и денег на разработку и сооружение заведомо неработоспособных установок.

УДК 539.217

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВДУВА ВОЗДУХА ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЕЛЬ ВОДЫ НА ПОРИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Низовцев М.И., Стерлягов А.Н.

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

Исследование процесса испарения капель жидкости является актуальной научной задачей. При этом большинство исследований, как правило, относится к испарению капель, лежащих на непроницаемой поверхности. В тоже время, значительный интерес представляет исследование испарения капель на пористых поверхностях при вдуве через них газов, что может внести существенные особенности в процессы тепло- и массопереноса при испарении. Данная задача представляет интерес, в частности, применительно к защите рабочих поверхностей различных энергетических устройств от воздействия высокотемпературных потоков газа [1].

В работе выполнен цикл экспериментальных исследований испарения капель воды, лежащих на различных пористых поверхностях. В экспериментах использовались 2 типа пористых поверхностей: пластина из пористой меди и пластина из волокнистого полипропилена. Пластина из пористой меди имела толщину 3 мм и среднюю пористость 51% при характерном размере пор 0,1 мм. Пластина из волокнистого полипропилена имела толщину 3 мм и среднюю пористость 84% при характерном размере пор 1 мм.

Эксперименты проводились с каплями воды объемом 5 мкл при постоянной температуре и влажности воздуха ( $t=24^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=24\%$ ). Воздух, подаваемый от компрессора, поступал под пористую пластину и продувался сквозь нее в направлении снизу-вверх. Средняя по поверхности пластины скорость вдува воздуха в эксперименте изменялась от 0 до 1 м/с.

В процессе экспериментов с применением скоростной микрофотосъемки фиксировалось изменение геометрических параметров испаряющихся капель. В результате было получено изменение диаметра контактного пятна капель, при различной скорости вдува воздуха. Полученные данные показали, что диаметр контактного пятна капель, лежащих на пластине из пористой меди, оставался практически неизменным в течение всего процесса испарения. При увеличении скорости вдува сокращалось время испарения капли, но диаметр контактного пятна капли в течение основного времени испарения капли не изменялся. Таким образом, на пористой медной поверхности реализовался режим испарения капель при постоянной контактной линии – «пиннинг» [2, 3]. Аналогичные зависимости были получены для испаряющихся капель воды, лежащих на пластине из волокнистого полипропилена. При испарении наблюдалось постепенное уменьшение диаметра контактного пятна капли воды при всех скоростях вдува. Таким образом, на пластине из волокнистого полипропилена реализовался режим испарения, при котором происходило движение контактной линии – «депиннинг» [2, 3].

На рис. 1 представлены зависимости времени испарения капель воды на пластине из волокнистого полипропилена и медной пористой пластине при различных скоростях вдува.

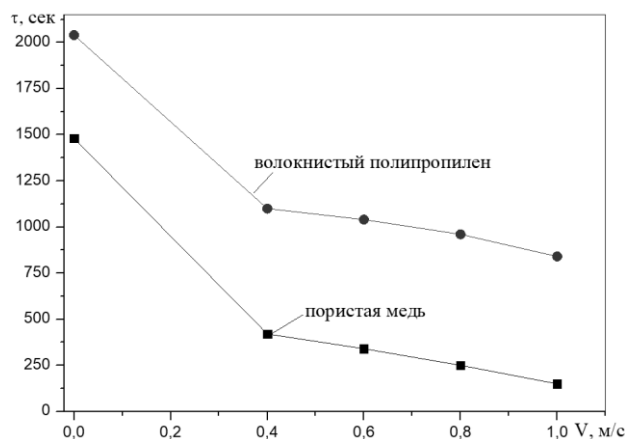


Рис. 1. Время испарения капель на разных пористых поверхностях при различных скоростях вдува

Полученные данные показывают, что испарение капель воды на пластине из полипропилена проходило медленнее, чем на пористой пластине из меди при одинаковых скоростях вдува воздуха. Как показали измерения с применением метода инфракрасной термографии это связано с разной температурой капель в процессе испарения на поверхностях материалов, что было обусловлено различиями в режимах испарения капель, а также различными коэффициентами теплопроводности поверхности [4]. При увеличении скорости воздушного потока время испарения капель уменьшалось, как на пористой медной поверхности, так и на поверхности волокнистого полипропилена. Таким образом, изменением скорости вдува воздуха через пористые материалы можно эффективно регулировать время испарения капель.

### Список литературы:

1. Леонтьев А.И. и др. Тепловая защита стенок плазмотронов/Низкотемпературная плазма //Т. 15. Новосибирск: ИТ СО РАН, 1995. 335 с. – 1995.
2. Kabeya-Mukeba L., Vandewalle N., Dorbolo S. The evaporation of sessile droplets onto solid surfaces: experiments and simulations of the contact line pinning-depinning //Sensors and Actuators. – 1997. – Т. 60. – С. 202–207.
3. Liu L. et al. Evaporation Characteristics of Sessile Droplet on Copper Surface at Constant Temperature //Available at SSRN 4038184.
4. Летушко В.Н., Низовцев М.И., Стерлягов А.Н., Шлюпиков М.Ю. Влияние фильтрации воздуха на испарение капель воды с поверхности пористых материалов // Ползуновский вестник. – 2016. – №. 3.



УДК 66.021.3, 66.021.4

**ВЛИЯНИЕ ПАРПРОНИЦАНИЯ НАРУЖНОЙ ОБЛИЦОВКИ И БАРЬЕРНОГО СЛОЯ  
НА УВЛАЖНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ФАСАДА ЗДАНИЯ****Низовцев М.И., Стерлягов А.Н.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Фасадные системы современных зданий представляют многофункциональные конструкции, которые обеспечивают комфортные условия для пребывания в них людей. В холодных и умеренных климатических регионах применяют фасадные системы, в состав которых входят слои из теплоизоляционных материалов. В настоящее время широкое распространение получили две основные фасадные системы с наружным утеплением, это вентилируемые фасадные системы [1, 2] и композитные фасадные системы с наружной теплоизоляцией [3]. Обе эти фасадные системы в летний период года предохраняют внутренние помещения от перегрева [4] и снижают затраты на кондиционирование, а в зимнее время обеспечивают низкий уровень тепловых потерь [5].

Одной из функций фасадных систем является защита материалов наружных стен от избыточной влажности. Фасад современного здания можно рассматривать, как многослойную конструкцию, состоящую из пористых материалов с различной паропроницаемостью. При разных наружных климатических параметрах, а также определенных температурно-влажностных условиях внутри помещений создается разность парциальных давлений водяного пара наружного и внутреннего воздуха, что в свою очередь, является причиной движения водяного пара через многослойную пористую конструкцию фасада. При движении пара в зависимости от паропроницаемости материалов слоев фасада и их сорбционных свойств может происходить конденсация и накопление влаги.

Большую роль в влагообменных процессах в фасадных системах играет паропроницаемость наружной облицовки фасада (фасадного слоя или нескольких слоев, которые расположены с наружной стороны теплоизоляционного слоя фасада). Проводя анализ влияния паропроницаемости наружной облицовки фасада на влагонакопление в материалах фасада, можно абстрагироваться от конкретных особенностей и рассматривать фасады типа вентилируемых и композитных с единых позиций, характеризуя внешнюю облицовку фасада определенным сопротивлением паропроницанию. Для вентилируемых фасадов это сопротивление отражает сопротивление вентилируемых прослоек или каналов и сопротивление входов и выходов из них, а для фасадов композитных это сопротивление обусловлено сопротивлением паропроницанию внешних штукатурных слоев или слоя внешней кирпичной облицовки.

Цель данной работы заключается в рассмотрении влияния сопротивления паропроницанию внешней облицовки фасада на содержание влаги в его материалах

в многолетнем цикле эксплуатации здания в условиях континентального климата с холодной зимой и относительно теплым летом. Также рассмотрена возможность применения внутри фасада тонких барьерных слоев при различной паропроницаемости наружной облицовки фасада для снижения влажности теплоизоляционного слоя.

Выполнены комплексные тепло-влажностные расчеты типовой наружной стены здания, состоящей из внутреннего конструкционного кирпичного слоя, внешнего минераловатного слоя утепления и наружной облицовки с различным сопротивлением паропроницанию с целью определения влияния паропроницания наружной облицовки на влажностное состояние материалов наружной стены здания при его эксплуатации в условиях континентального климата.

В результате расчетов получено, что при увеличении сопротивления паропроницанию наружной облицовки фасада  $S_d > 0.2$  м в слое утеплителя наблюдался рост средней относительной массовой влажности более 3%. Расчеты показали, что установка внутри фасада барьерных слоев с определенным сопротивлением паропроницанию позволяет предотвратить избыточное накопление влаги в материалах фасада.

Предлагаемый подход с использованием внутреннего барьерного слоя может быть применен при разработке различных конструкций фасадов зданий с наружным утеплением для защиты слоя утеплителя от увлажнения в холодный период года в регионах с континентальным климатом.

**Список литературы:**

1. Maria Ibanez-Puy, Marina Vidaurre-Arbizu, Jose Antonio Sacristan-Fernandez, Cesar Martin-Gomez. Opaque Ventilated Facades: Thermal and energy performance review// Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V79. P.180–191.
2. V.N. Borodulin, M.I. Nizovtsev. Modeling of the thermal and humidity state of the building facade insulation system based on panels with ventilated channels// Journal of Building Engineering. 2021. V40. 102391.
3. Eva Barreira and Vasco P. de Freitas. External Thermal Insulation Composite Systems: Critical Parameters for Surface Hygrothermal Behaviour// Advances in Materials Science and Engineering. 2014. 16 p.
4. M.A. Shameri, M.A. Alghoul, K. Sopian, M. Fauzi, M. Zain, O. Elayeb. Perspectives of double skin facade systems in buildings and energy saving// Renewable Sustainable Energy Rev. 2011. V15. P. 1468–1475.
5. Cristina Sanjuan, Maria Nuria Sánchez, Maria del Rosario Heras, Eduardo Blanco. Experimental analysis of natural convection in open joint ventilated façades with 2D PIV// Build Environ. 2011. V46. P. 2314–2325.

УДК 621.039.58

## РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА КОНВЕРСИИ ПРИ ПАРОВОМ ВЗРЫВЕ В УСЛОВИЯХ ПРОТЕКАНИЯ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

Николаева А.В., Астахов В.В., Литышев А.В., Пантюшин С.И.

АО ОКБ «Гидропресс»,

142103, Россия, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21

В ходе тяжелых аварий (ТА) на реакторной установке (РУ) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) при взаимодействии расплава активной зоны с теплоносителем может иметь место такое явление, как паровой взрыв. Это явление может угрожать целостности корпуса реактора и контейнента (рис. 1).

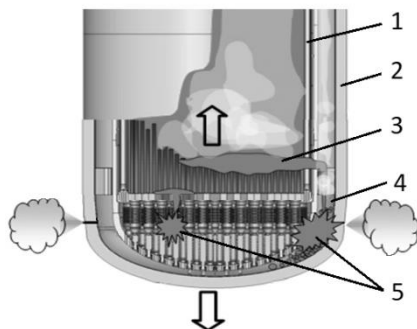


Рис. 1. Схема развития парового взрыва (внутрикорпусная стадия ТА). 1 – внутрикорпусная шахта, 2 – корпус, 3 – расплав активной зоны, 4 – теплоноситель, 5 – паровой взрыв.

Одним из основных параметров, определяющих мощность парового взрыва в полуэмпирических методиках [1, 2], является коэффициент конверсии CR (conversion ratio, другое распространенное обозначение –  $\delta$ ). CR – это доля энергии расплава, переходящей в механическую работу. На настоящий момент отсутствуют корреляции для оценки CR. В применяемых методиках [1, 2] CR задается как наибольшее значение данного параметра, полученное в экспериментах с учетом погрешности экспериментов в 50% ( $CR=4-7\%$ ). Однако такой подход не всегда корректен. Дело в том, что CR, в свою очередь, сложным образом связан с рядом различных параметров, сопутствующих процессу парового взрыва. И максимальное эмпирическое значение CR может не являться консервативным для всех сценариев ТА с РУ ВВЭР. С другой стороны, рассматриваемое в расчетах значение CR может быть и в значительной мере завышенным, что противоречит самой концепции выполнения расчетов для ТА как реалистических [3].

В данном исследовании изучены результаты более 190 экспериментов, моделирующих взаимодействие расплава с теплоносителем с применением расплава кориума (TROI, FARO, KROTOS-KFC, ZREX, ANL) и модельных расплавов (KROTOS Huhtiniemi, MISTEE, SUW, WUMT, MIXA, EXPO-FITS, FITS, ALPHA, WFCI и другие).

Для получения искомых зависимостей применялся метод анализа размерностей [4].

По результатам данного исследования были выведены зависимости максимального значения коэффициента конверсии:

$$CR = \frac{e^{-\frac{(\frac{\Delta T_f}{\Delta T_m} - 1)^2}{350}} (1 - 0,82 \cdot (1 - R_{Zr}))}{0,44 + \left(\frac{M_m}{M_f}\right)^{1,5}} \quad (1)$$

где  $M_m/M_f$  – масса расплава, приведенная к массе теплоносителя;

$\frac{\Delta T_f}{\Delta T_m}$  – отношение приведенного значения недогрева теплоносителя до температуры насыщения к приведенному значению перегрева расплава выше температуры плавления;

$R_{Zr}$  – массовая доля циркония (Zr и  $ZrO_2$ ) во взаимодействующем расплаве для расплава кориума.

Формула выведена для  $\frac{\Delta T_m}{\Delta T_f} > 0$  (при  $\frac{\Delta T_m}{\Delta T_f} \leq 0$  расплав полностью или частично кристаллизован, и условий для взрыва не создается) и  $\frac{\Delta T_f}{\Delta T_m} \geq 0$  (при  $\frac{\Delta T_f}{\Delta T_m} < 0$  теплоноситель находится в газообразном состоянии, условия для реализации парового взрыва отсутствуют).

Как показало исследование, величины CR, вычисленные по корреляции (1), являются огибающими (получены для идеальных условий) и лежат выше данных, полученных в ходе экспериментов.

Применение разработанной в данном исследовании эмпирической корреляции (1) показывает, что максимальные значения коэффициента конверсии для ТА на РУ с ВВЭР составляют  $CR=0,006-0,04\%$ . Таким образом, с учетом двукратного коэффициента запаса CR не превышает 0,1%. Это говорит о том, что мощность парового взрыва в существующих методиках [1–2] завышена более чем в 40 раз. Такая оценка является излишне консервативной.

### Список литературы:

1. Астахов В.В., Николаева А.В., Гаспаров Д.Л., Пантюшин С.И. и др. Методика оценки нагружения корпуса реактора ВВЭР-1200 при внутрикорпусных паровых взрывах / Известия Российской академии наук. Энергетика. 2018. № 5. С 42–58.
2. Николаева А.В., Гаспаров Д.Л., Пантюшин С.И. и др. Анализ возможности реализации тяжелых аварий  $\alpha$ -типа на РУ ВВЭР-1200/ Тяжелое машиностроение. 2016. № 11–12. С. 39–47.
3. Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants, SSG-2 (Rev. 1), IAEA, 2019.
4. P.W. Bridgman Dimensional analysis / Yale University Press. New Haven. 1932.

УДК 621.039.58

## ВАЛИДАЦИЯ CFD МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОГО СМЕШЕНИЯ В ПРИЛОЖЕНИИ К ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Николаева А.В., Литышев А.В., Пантюшин С.И.

АО ОКБ «Гидропресс»,

142103, Россия, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21

Большинство аварий, связанных с водородной безопасностью, начинаются с утечки водорода, его распространения в воздушном (паровоздушном) пространстве с последующей детонацией или дефлаграцией. Что может повредить оборудование и поставить в опасность жизнь и здоровье обслуживающего персонала.

На настоящий момент распространение водорода в контейнменте в ходе тяжелой аварии на атомных электростанциях моделируется интегральными кодами (расчетный код (РК) СОКРАТ для моделирования первого и второго контуров реакторной установки и РК АНГАР или РК КУПОЛ для моделирования контейнмента). Интегральная постановка задачи не дает представления о распределении локальных параметров, которые могут характеризоваться более опасными концентрациями водорода с точки зрения его детонации/дефлаграции. Для этих целей рационально применять трехмерные подходы. Например, CFD.

В атомной отрасли можно выделить следующие проекты, посвященные валидации CFD кодов в части распространения водорода в больших объемах:

- международный проект HyIndoor на основе экспериментальных исследований по водородной безопасности CEA (Франция);
- проект Gamelan (CEA) [1, 2];
- OECD/NEA-PSI CFD BENCHMARK (PANDA facility) [3];
- проект OECD/NEA Nuimeris и другие.

В данном исследовании представлены результаты моделирования распространения гелия в замкнутом пространстве с различными вариантами впрыска и вентиляции гелия, который используется в качестве безопасной замены водорода в экспериментальных исследованиях. Проведено моделирование процессов для трех экспериментальных исследований в диапазоне от переходного до развитого турбулентного режима течения, с различными числами Фруда (который определяет режим распространения гелия в воздушном пространстве). Исследованы процессы стратификации и эрозии стратифицированного слоя гелия. Исследование включает в себя некоторые результаты проекта OECD / NEA-PSI PANDA benchmark и проекта Gamelan.

Проведен анализ применимости для данного класса задач различных моделей турбулентности, реализованных в рамках коммерческих кодов STAR-CD,

STAR-CCM+, ANSYS CFX и различных типов сеточных моделей (полиэдрические и гексаэдрические размером от 12 до 263 тысяч контрольных объемов на  $1 \text{ м}^3$  расчетной области).

Сопоставление результатов численных исследований с экспериментальными данными показало хорошее совпадение. В частности, для переходного и турбулентного режимов погрешность результатов численных исследований лежит в диапазоне от 5 до 15% для всех рассмотренных моделей турбулентности (в качестве примера на рис.1 приведено сопоставление результатов моделирования с применением различных РК и моделей с экспериментальными данными). Это указывает на применимость CFD методов для проблем водородной безопасности в рассматриваемом диапазоне физических явлений.

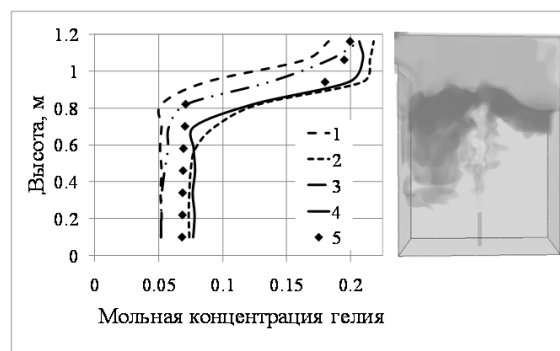


Рис. 1. Сопоставление распределений мольных концентраций гелия по высоте модели в установившемся режиме ( $t=400\text{с}$ ), полученных в результате расчетов (1–4) и в рамках эксперимента (5) (истечение среды при  $Re=2863$ , эксперимент E4). 1 – SAS SST (Ansys CFX); 2 –  $k-\omega$  SST (STAR-CD); 3 – LES WALE (star-ccm+); 4 –  $k-\omega$  SST (star-ccm+); 5 – экспериментальные данные.

### Список литературы:

1. Cariteau B., Tkatschenko I. Experimental study of the effects of vent geometry on the dispersion of a buoyant gas in a small enclosure // ICHS 2011. — San Francisco, USA, 2011.
2. Rapport DM2S/SFME/LEEF RT/2010-016/A : Rep. / CEA ; Executor: B. Cariteau : 2010.
3. Andreani M., Badillo A., Kapulla R. SYNTHESIS OF THE OECD/NEA-PSI CFD BENCHMARK EXERCISE/CFD4NRS-5. — Zurich, Switzerland, 2014.

УДК 621.039.58

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ, ОХЛАЖДАЕМЫХ ВОДОЙ СКД

Николаева А.В., Чуркин А.Н., Шебанова О.В., Пантюшин С.И.

АО ОКБ «Гидропресс»,

142103, Россия, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21

В связи с явными преимуществами реакторы на сверхкритическом давлении (СКД) рассматриваются GIF [1] в качестве одной из возможных концепций реакторов четвертого поколения. Однако, для реакторов этого типа существует ряд нерешенных проблем, затрудняющих развитие данной технологии. Одна из таких проблем – сложность моделирования теплогидравлических процессов в области критических и псевдокритических параметров воды СКД [1]. Процессы в рассматриваемой области малопрогнозируемы с применением существующих моделей. В частности, имеются проблемы при моделировании процессов в области близкой к псевдокритическим параметрам. Это связано с резким изменением свойств жидкости в пристеночной области вблизи псевдокритической температуры.

В рамках GIF [2] в качестве возможного пути решения проблемы рассматривается применение CFD кодов. Однако, далеко не все CFD коды позволяют удовлетворительно описать изменение теплофизических свойств воды вблизи критической и псевдокритических точек.

В рамках настоящего исследования разработана методика задания теплофизических свойств воды СКД в CFD кодах на основе стандартов IAPWS-IF97 и IAPWS-95, а так же проведено ее тестирование и программная реализация в коде star-ccm+. Программная реализация методики осуществлялась на основе JDK 1.3 (Java). Разработанное ПО позволяет формировать исходные данные о теплофизических свойствах воды СКД в табличной и полиномиальной форме. ПО отчуждаемо от разработчика и оснащено пользовательским интерфейсом (см. рис.1). Применение графических интерфейсов снижает вероятность возникновения пользовательских ошибок при использовании разработанного ПО и общие временные затраты на разработку моделей каналов, охлаждаемых водой СКД.

С применением разработанной методики реализована CFD модель канала, охлаждаемого водой СКД (труба круглого сечения). На основе результатов валидации модели авторами даны рекомендации по выбору параметров CFD модели (топология и размерность сеточной модели, модель турбулентности, источник данных о теплофизических свойствах воды

СКД, величина турбулентного числа Прандтля). Проведенные в соответствии с [3] верификационные исследования показали, что разработанная модель позволяет прогнозировать в режиме нормального теплообмена изменение целевых параметров объекта исследования с погрешностью 0,4–10,0%. Погрешность моделирования рассматриваемых параметров укладывается в погрешность экспериментальных данных, характерную для измерения параметров теплообмена в жидкостях СКД.

Разработанная модель позволяет качественно определить наличие режимов ухудшенного теплообмена в канале. Однако, для применения модели с целью определения значений основных теплогидравлических параметров в режимах ухудшенного теплообмена в РУ СКД модель должна быть доработана на последующих этапах исследования.

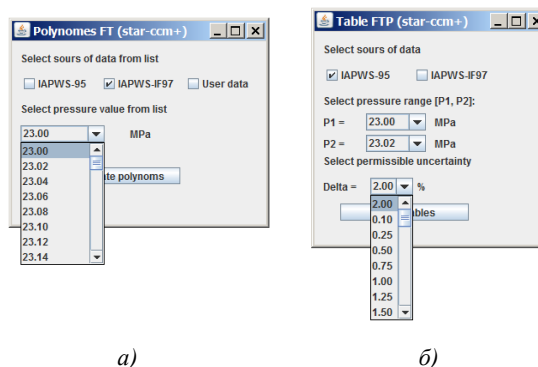


Рис. 1. Графический интерфейс для программной реализации методики задания теплофизических свойств в ПО star-ccm+ в виде полиномов (а) и в табличном виде (б).

### Список литературы:

1. Нерешенные проблемы тепло- и массообмена водоохлаждаемых реакторных установок со сверхкритическими параметрами теплоносителя / В.Н. Блинков, Б.А. Габараев, О.И. Мелихов, С.Л. Соловьев // Препринт НИКИЭТ. ЕТ-08/76, М., 2008.
2. The Generation IV International Forum (GIF), URL: [https://www.gen-4.org/gif/jcms/-c\\_9260/public](https://www.gen-4.org/gif/jcms/-c_9260/public) [электронный ресурс].
3. Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications. NEA1/CSNI/R (2007) 5, 154 p.

УДК 621.039.63

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СБОРКЕ ОПОРЫ ВНУТРЕННЕГО БЛАНКЕТА ИТЭР ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ

Никулин Б.И.<sup>1,2</sup>, Поддубный И.И.<sup>1</sup>, Свириденко М.Н.<sup>1</sup>, Данилов И.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «Орден Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалея», Москва, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Защитный бланкет реактора ИТЭР состоит из 440 модулей бланкета (МБ), каждый из которых механически закреплен на вакуумной камере (ВК) с помощью четырех опор. Главным элементом конструкции опоры является гибкий картридж, состоящий из двух фланцев, между которыми располагается ряд из 18 спиц. Нижний фланец опоры крепится к корпусу ВК, верхний – к МБ с помощью центрального болта М64х4 и системы конической гайки и втулки. Для обеспечения электрической изоляции опоры от ВК используется оксид алюминия, который наносится на внешнюю коническую поверхность гайки и нижнюю плоскую поверхность втулки.

Конструкционные материалы компонентов опоры имеют различный коэффициент термического расширения, что приводит к возникновению термоупругих напряжений и последующему уменьшению осевого усилия затяга болта, изначально имеющего величину, лежащую в диапазоне (600–1200) кН. При срывах плазмы в МБ индуцируются знакопеременные электромагнитные силы, что может привести к раскрытию стыка на интерфейсе «коническая втулка-картридж» и при циклическом режиме работы реактора ИТЭР к разрушению изоляции с последующим протеканием тока, сопровождающимся омическим нагревом.

Данная работа посвящена анализу полей температуры в сборке гибкой опоры в нормальном и аварийном режимах. Расчеты выполнены в среде ANSYS Mechanical APDL.

Целью теплового расчета является нахождение температурных полей в режиме Inductive I, представляющего собой последовательность режимов горения плазмы в течении 450 с (при этом энерговыделение, обусловленное нейтронным потоком, максимально) и режимов паузы с нулевым энерговыделением длительностью 1800 с. Для решения задачи используются нестационарное уравнение теплопроводности с учетом внутреннего экспоненциально спадающего по оси опоры энерговыделения, граничные (интерфейс на границе с ВК – 100°C, на границе с модулем бланкета – 130°C) и начальные условия (для всех компонентов опоры – 100°C), условия сопряжения на соприкасающихся поверхностях различных компонентов опоры [1]. Контактная проводимость на поверхностях с электроизоляцией принималась равной 200 Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Максимальная температура в картридже достигает 156°C. При этом поле температуры в опоре линейно спадает от МБ к ВК.

Анализ напряженно-деформированного состояния проводился при следующих шагах нагружения: затяг болта 600 кН при 20°C, равномерный разогрев до 100°C, приложение температурных полей в конце режимов паузы и горения, поперечное смещение МБ на 1.6 мм и разворот на 0.085°, осевая растягивающая

сила 600 кН. Последние 3 шага обусловлены действиями электромагнитных сил при срывах плазмы, вызванных током величиной 137 кА. Расчет напряженно-деформированного состояния основывается на совместном решении уравнений Дюгамеля-Неймана, сплошности, соотношений Коши вместе с граничными условиями и условиями сопряжения [2].

В режиме Inductive I усилие затяга центрального болта опоры падает до 496 кН, что приводит к раскрытию стыка при совместном действии электромагнитной силы 600 кН и комбинации смещения МБ и разворота. Раскрытие стыка может привести к разрушению электроизоляции и аварийному режиму работы бланкета, когда ток пойдет через опору.

Целью электрического расчета опоры является нахождение поля джоулевого тепловыделения. Рассчитанное энерговыделение накладывается на опору в нестационарном тепловом расчете в течении 300 мс, где за начальное температурное поле принимается поле в конце режима горения. Максимальная температура в картридже возрастает более чем в 6 раз (рис. 1) и достигает 966°C. Остывание до рабочей температуры опоры происходит за 4100 с.

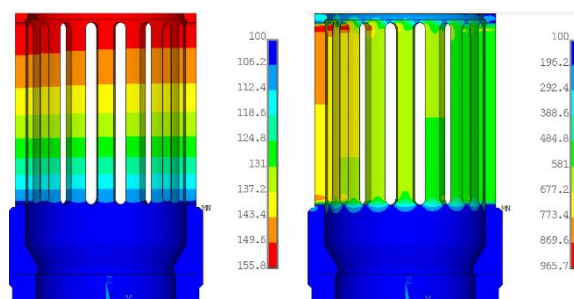


Рис. 1. Температурные поля картриджа в конце режима горения (слева) и при нарушении изоляции (справа) в °C

Такие высокие температуры сопровождаются значительными термическими напряжениями, которые в свою очередь могут привести к потере несущей способности картриджа и разрушению конструкции сборки опоры, что говорит о необходимости предотвращения раскрытия стыка. Тем не менее при нормальном режиме работы сборки опоры и отдельные ее компоненты удовлетворяют критериям статической и усталостной прочности SDC-IC, что говорит о расчетном обосновании конструкции сборки опоры и ее компонентов.

### Список литературы:

1. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: учебное пособие для вузов. – Энергия, 1981.
2. Варданян Г. С. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. – 2011.

УДК 621.039.4

## ВЕРИФИКАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CFD КОДА ПРИ АНАЛИЗЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССОБМЕНА В АКТИВНЫХ ЗОНАХ ТИПА ВВЭР

Носков А.С., Фальков А.А., Лукьянов В.Е.

АО «ОКБМ Африкантова»,  
603074, Россия, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15

В АО «ОКБМ Африкантов» проводятся работы по совершенствованию конструкций тепловыделяющих сборок для активных зон реакторов ВВЭР, PWR и РИТМ в целях повышения ресурсной надежности, технико-экономических характеристик и обеспечения безопасности.

Особенности конструкции тепловыделяющих сборок, наличие неоднородностей, эксплуатация смешанных активных зон, состоящих из сборок различных типов, приводят к необходимости изучения локальных характеристик течения теплоносителя и дополнительного экспериментального и расчетного обоснования.

Для анализа течения теплоносителя в условиях активных зон используются ячейковые теплогидравлические коды и трехмерные гидродинамические CFD коды.

Верификация CFD кодов.

В АО «ОКБМ Африкантов» выполнен большой объем работ по верификации CFD кода STAR-CCM+ для задач описания гидродинамики активных зон, включая:

- сопоставление с проверенными зависимостями коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для труб круглого сечения;
- верификацию на экспериментальных данных по гидросопротивлению различных элементов тепловыделяющих сборок;
- сравнение распределения скоростей теплоносителя по длине фрагментов тепловыделяющих сборок с данными, полученными с использованием эмпирических соотношений по гидросопротивлению и с результатами расчетов по аттестованному теплогидравлическому коду;
- сопоставление расчетных и экспериментальных данных по распределению скоростей теплоносителя в фрагментах смешанных активных зон различного масштаба.

В результате выполненных работ по верификации CFD кода подтверждена возможность корректно рассчитывать гидросопротивление, распределение расходов по ячейкам и обтекание гидравлически неидентичных элементов тепловыделяющих сборок [1].

Применение CFD кодов.

Специалистами АО «ОКБМ Африкантов» выполнен CFD анализ тепломассобменных процессов в активных зонах для следующего круга задач.

1. Исследование течения теплоносителя в смешанных активных зонах. Полученные в результате CFD анализа распределения расходов и поля скоростей теплоносителя использовались при обосновании теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР и PWR [2].

2. Анализ течения в различных элементах тепловыделяющих сборок (хвостовик, дистанционирующая решётка, головка) в целях снижения гидросопротивления. В результате расчетно-экспериментальных работ в конструкцию внедрены незначительные технические усовершенствования, с помощью которых удалось снизить гидросопротивление сборки на ~5%.

3. Разработка антидебрисного фильтра нового поколения. С помощью CFD анализа выбрана конструкция фильтра, оптимальная с точки зрения фильтрующей способности и гидравлического сопротивления.

4. Оптимизация интенсификаторов теплообмена. В конструкции тепловыделяющих сборок используются дистанционирующие решетки с перемешивающими дефлекторами для увеличения интенсивности теплообмена и увеличения запасов до кризиса теплоотдачи.

В результате проведенного анализа выбраны перспективные дефлекторы по критериям теплогидравлической эффективности. Даны рекомендации по использованию критериев теплогидравлической эффективности.

Таким образом, верификация и использование CFD кода при анализе гидродинамики и тепломассообмена в активной зоне позволили оптимизировать конструкции тепловыделяющих сборок в рамках совершенствования их эксплуатационных характеристик.

Список литературы:

1. A.S. Noskov, A.A. Falkov, D.L. Shipov. STAR-CCM+ Verification and Application for a Core Fluid Dynamics Analysis // CFD4NRS-7 OECD-NEA & IAEA Workshop, Shanghai, China, 4-6 September 2018.
2. A.S. Noskov, A.A. Falkov, D.L. Shipov, V.E. Lukyanov, O.N. Morozkin. Hydrodynamic analysis of a flow in a mixed core // Journal of physics: Conference series. 1359 (2019) 012084.

УДК 621.45.022.7

## ВЛИЯНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОГО ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ЗА КОМПРЕССОРОМ НА ГАЗОДИНАМИКУ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

Носкова К.Р., Гурьянов А.И., Гурьянова М.М.

ФГБОУ ВО Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва,  
152934, Россия, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Несимметричный профиль скорости, формирующийся на выходе из компрессора, возникает в связи с нестационарностью течения от взаимодействия рабочего колеса и спрямляющего аппарата, остаточной закрутки потока. Вследствие влияния несимметричности ухудшаются интегральные характеристики камеры сгорания (КС) [1, 2]. Поэтому существует необходимость в изучении влияния профиля скорости за компрессором на газодинамическую эффективность камеры для разработки методики совершенствования рабочего процесса в КС ГТД.

Проведены расчетно-экспериментальные исследования в центробежном компрессоре, диффузоре и камере сгорания ГТД. Величина несимметричности эпюры скорости оценивается коэффициентом  $K$ , определяемым отношением среднерасходных скоростей потока в верхнем и нижнем полуканалах.

В результате численных расчетов на выходе из компрессора получена эпюра скорости с коэффициентом  $K < 1$ . Также спроектированы генераторы для имитации несимметричности течения, на выходе из которых формируются симметричная ( $K = 1$ ) и несимметричные эпюры с  $K$ , отличным от 1. Полученные профили скорости заданы на вход диффузора и КС в виде начальных условий. Расчеты проведены в трехмерной, стационарной и нестационарной постановках на  $15^\circ$  секторах моделях проточной части, дискретизация которых выполнена в виде неструктурированной сетки с тетрагональными элементами.

Основное влияние на течение оказывают два вихря, формирующиеся при внезапном расширении потока. Размер рециркуляционных зон возрастает с увеличением степени внезапного расширения. При симметричной эпюре скорости наружный и внутренний кольцевые каналы равномерно заполняются массами воздуха, также равномерно затекание воздуха во фронтное устройство. В области внезапного расширения отчетливо образуются зоны обратных токов. В лобовой точке фронтного устройства, отвечающего за затекание воздуха в жаровую трубу и формирование топливовоздушной смеси, образуется достаточно равномерное по обтеканию поле давления. При искажении эпюры скорости на выходе из генератора несимметричности, например при  $K < 1$ , преимущественно расход воздуха направлен в нижний кольцевой канал. Интенсивность отрывной зоны в области внезапного расширения в этом случае существенно возрастает, наблюдается не лобовое столкновение максимального импульса струи с обтекателем, явный максимум в нижнем кольцевом канале и недостаток расхода охлаждающего воздуха в верхнем. Это приводит к существенно неравномерной подаче в зону смешения через крупные охлаждающие отверстия как в

верхней, так и в нижней стенках жаровой трубы. Вблизи нижней стенки возникает интенсивное вихревая зона и на выходе из КС наблюдается неравномерный профиль скорости со смещением линий тока и максимумом расхода в верхней стенке жаровой трубы, что отрицательно скажется на работе турбины, так как равномерность расхода воздуха по высоте выходного сечения камеры для нее имеет существенное значение.

Для верификации численного моделирования выполнены опытные исследования на модели проточной части КС с использованием системы подкрашенных струй и ламинарного течения в гидравлическом лотке. Выяснено, что при  $K = 1$  на входе в диффузор равномерное распределение линий тока, также достаточно равномерно затекание рабочего тела во фронтное устройство. При искажении профиля скорости на выходе из генераторов несимметричности наблюдается смещение потока в наружный ( $K > 1$ ) или внутренний ( $K < 1$ ) кольцевые каналы. Это приводит к уменьшению эффективности охлаждения жаровой трубы, равномерности распределения воздуха во фронтном устройстве, снижается качество перемешивания топливовоздушной смеси, на выходе из ЖТ формируется неравномерное распределение линий тока, а это может отрицательно сказаться на работе турбины.

Вследствие искажения входной эпюры в область  $K > 1$  и  $K < 1$  потери полного давления увеличиваются в кольцевых каналах, фронтном устройстве в 1,5–1,6 раз от суммарных потерь в КС в отличие от случая  $K = 1$ . Также возрастают потери давления во фронтном устройстве в 1,4–1,65 раз от общих потерь в жаровой трубе. Поэтому при проектировании КС важным моментом является сохранение величины несимметричности в диапазоне значения  $K$ , близким к 1, что позволяет обеспечить максимально полную величину давления на выходе КС и соответственно минимум гидравлических потерь.

### Список литературы:

1. Guryanova, M. M. Investigation of the Effect of the Output Parameters of the Flow behind the Compressor on the Gas Dynamics of the Separation Diffuser of the Combustion Chamber / M. M. Guryanova, K. R. Timofeeva, A. I. Guryanov // AIP Publishing. – 2020. – №2211. – Pp. 1–5.
2. Гурьянова, М. М. Расчетно-экспериментальное исследование газодинамики камеры сгорания ГТД / М. М. Гурьянова, К. Р. Тимофеева, А. И. Гурьянов // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьёва. – №4 (51). – 2019. С. 32–40.

*Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы 0774-2020-0004; АААА-А20-120120790010-3).*

УДК 532.663, 536.658

## ТРАНСФОРМАЦИЯ РЕЗОНАНСНЫХ СОЛИТОНОВ НА ГРАНИЦЕ ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕД С РАЗНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Огородников И.А.

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

Трансформация солитонов под воздействием различных факторов быстро развивающаяся область исследований [1]. Свойства резонансных солитонов в пузырьковых средах [2] практически не исследованы.

Целью работы является определение характеристик трансформации резонансных солитонов большой амплитуды при переходе солитона через границу пузырьковых областей с разными размерами пузырьков.

Постановка задачи. В воде находится пузырьковая область, разделенная на две части с одинаковым значением объемного газосодержания. Размеры пузырьков в этих частях разные. Из чистой жидкости на пузырьковую среду падает возбуждающий импульс, из которого в среде формируется резонансный солитон. Предметом исследования являются характеристики трансформации резонансного солитона при переходе из одной среды в другую. Рассмотрены два противоположных направления движения резонансного солитона.

Расчеты проводились с использованием волновой системы уравнений [2] в одномерной постановке. Амплитуда возбуждающих импульсов  $P_e=0.3\text{MPa}$ . Далее, этой величине в безразмерном виде соответствует 1. Резонансная частота крупных пузырьков ( $R=6 \cdot 10^{-5}\text{ м}$ ) равна  $54,4\text{ кГц}$ , а мелких ( $R=3 \cdot 10^{-5}\text{ м}$ ) равна  $108,8\text{ кГц}$ . Длительности возбуждающих импульсов выбирались из условия, чтобы в каждой части пузырьковой среды сформировался один солитон с минимальным уровнем возбуждения среды и излучения звукового предвестника.

Обозначения на графиках: 1 – резонансный солитон, 2 – радиусы пузырьков, 3 – зона возбуждения пузырьковой среды, 4 – звуковой предвестник.

Трансформация солитона, при движении из области с большими пузырьками в область с меньшими пузырьками, представлена на рис. 1.

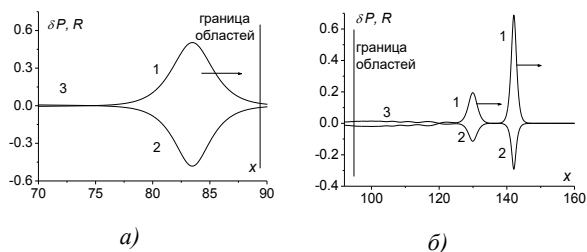


Рис.1. Трансформация резонансного солитона при переходе через границу между областями с разными пузырьками. а) перед границей, б) после границы.

Резонансный солитон внутри среды сформировался с амплитудой  $P_c=0.5I$ , значение радиуса в цен-

тре солитона  $R_n=0.68R_0$ . Полная энергия солитона перед прохождением границы  $E=0.33\text{ J}$ . После прохождения границы раздела, из исходного резонансного солитона сформировалось два солитона. Энергия возбуждения среды  $E=0.006\text{ J}$ , что на два порядка меньше энергии солитона. Амплитуда первого солитона больше исходного, а второго, меньше. Суммарная энергия двух солитонов  $E=0.31\text{ J}$  меньше энергии исходного солитона на величину энергии возбуждения среды. В этом случае звуковой предвестник не излучается, а возбуждение среды минимально.

При движении солитона из области с мелкими пузырьками в область с большими пузырьками картина существенно изменяется. После перехода границы формируется один солитон, излучается звуковой предвестник и в окрестности границы возникает интенсивная зона возбуждения. На рис. 2 представлены графики, которые иллюстрируют этот процесс.

Полная энергия исходного солитона, который претерпевает трансформацию при переходе через границу  $E_c=0.186\text{ J}$ , а энергия возбуждения среды  $E_{ac}=0.004\text{ J}$ . Полная энергия  $E=0.193\text{ J}$ . В процессе перехода из приграничной области излучается звуковой предвестник с энергией  $E_n=0.0004\text{ J}$ . При этом энергия солитона  $E_c=0.137\text{ J}$ , энергия возбуждения среды  $E_{ac}=0.053\text{ J}$ , а полная энергия всех составляющих  $E=0,193\text{ J}$ .

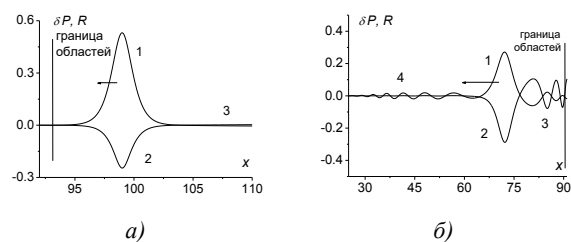


Рис.2. Трансформация резонансного солитона при переходе через границу между средами а) до перехода, б) после перехода.

### Список литературы:

1. А.М. Гумеров, Е.Г. Екомасов, Р.Р. Муртазин, В.Н. Назаров. Трансформация солитонов уравнения синус гордона в моделях с переменными коэффициентами и затуханием//Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. Т. 55, № 4, С. 631–640.
2. И.А. Огородников, В.Ю. Бородулин. Микроскопическая модель динамики гетерогенной среды. Взаимодействие акустических волн с пузырьковыми слоями// Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 2. С.70–81.



УДК 533.697.3

## ВЛИЯНИЕ РАСХОДА НЕСУЩЕЙ ФАЗЫ НА ОСАДОЧНЫЙ СЛОЙ ШЛАМА В КОЛЬЦЕВОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ В ОКРЕСТНОСТИ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ МУФТЫ

Орлик Е.В.<sup>1</sup>, Бочаров О.Б.<sup>1</sup>, Игнатенко Я.С.<sup>1</sup>, Гаврилов А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Бейкер Хьюз, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Кутателадзе 4а

<sup>2</sup> Красноярский филиал Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 660036, Россия, Красноярск, ул. Академгородок 50/44

Наклонно-направленное бурение (ННП) имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционным бурением, но и требует организации эффективного выноса шлама из скважины. Недостаточная очистка ствола скважины может негативно влиять как на работоспособность агрегатов, так и приводить к технологическим отклонениям в процессе бурения и риску возникновения аварий на скважине. В процессе бурения циркуляция раствора в скважине осуществляется в кольцевом пространстве переменного сечения между буровой колонной и внешней стенкой. Изменение поперечной площади обусловлено тем, что трубы соединяются муфтами, имеющими больший диаметр. В настоящее время ведутся интенсивные исследования режимов течения и седиментации шлама в наклонных кольцевых каналах постоянного сечения для различных по реологии буровых растворов, однако влиянию соединительных муфт на перенос шлама не уделяется должного внимания из-за сложности проблемы, хотя известно, что муфты оказывают существенное влияние на гидродинамику и перепад давления для случая однофазного потока [1]. Данная работа является развитием работы [2], в которой, методом численного моделирования, рассматривалось формирование седиментационного осадка в окрестности соединительной муфты в кольцевом горизонтальном канале при ламинарном режиме течения ньютоновской жидкости.

В данной работе рассмотрено влияние расхода несущей фазы (ньютоновская жидкость) на динамику осадочного слоя в окрестности муфты при отсутствии вращения буровой колонны. Внутренний и внешний диаметры кольцевого канала: 5 и 8.5 дюймов. Диаметр соединительной муфты 6.625 дюйма, длина муфты 22 дюйма и эксцентриситет на муфте 0.8. Максимальный размер расчетной области составлял 30 м, что существенно больше расстояния между муфтами, которое при строительстве скважин обычно составляет 4.5–15 м. Режимные параметры потока взяты близкими к технологическим при бурении скважин с объемной концентрацией частиц в смеси  $C = 0.06$  (6%), диаметр частиц 1 мм. Численное моделирование проводилось в нестационарной 3D постановке на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса ( $Re \in (300, 1500)$  или  $U \in (0.53, 2.65 \text{ м/с})$ ).

Предварительно проводились расчеты течения в кольцевом канале постоянного сечения с целью определения толщины осадочного слоя и длины области его формирования. На входе задавалось равномерное распределение объемной концентрации твердой фазы, а для скорости бралось стационарное решение для кольцевого канала. Такая постановка имеет смысл, так как на границе долота, можно рассматривать суспензию гомогенизированной. С увеличением расхода суспензии относительная толщина осадочного слоя снижается (отношение площади осадка к площади поперечного сечения зазора). В тоже время, длина области выхода на постоянное значение смещается вниз по потоку, что отчетливо видно на рисунке 1.

При наличии муфты в канале использовались граничные условия на входе и начальные значения из установившегося течения суспензии в зазоре со сформированным донным осадком. Из рисунка 2 видно, что наличие муфты и повышение расхода в канале приводит к частичному размыву осадочного слоя за ней, который на некотором удалении от муфты восстанавливается практически до исходного состояния ( $Re \leq 1200$ ). Далее, при  $Re \geq 1350$ , осадочный слой за муфтой перестает формироваться на рассмотренных расстояниях. Течение за муфтой при таком расходе становится существенно нестационарным. Появляются значительные флуктуации поперечной компоненты скорости суспензии, которые и препятствуют формированию осадочного слоя.

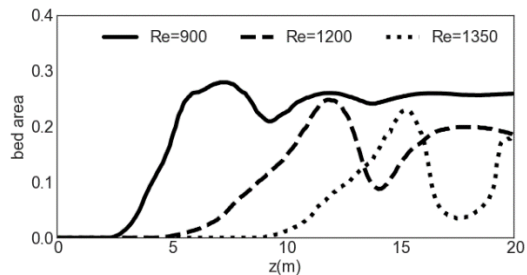


Рис. 1. Распределение доли осадочного слоя в кольцевом канале постоянного сечения.

Рис. 2: A line graph showing the distribution of the bed area in an annular channel with a tool joint. The x-axis is labeled 'z(m)' and ranges from 0 to 30. The y-axis is labeled 'bed area' and ranges from 0.0 to 0.6. Four curves are plotted for different Reynolds numbers: Re=900 (solid line), Re=1200 (dashed line), Re=1350 (dotted line), and TJ ends (dash-dot line). The TJ ends curve shows a sharp peak of approximately 0.55 at z=5. The Re=900 curve peaks at about 0.25 around z=10. The Re=1200 curve peaks at about 0.2 around z=15. The Re=1350 curve peaks at about 0.15 around z=20. The curves for Re=900, 1200, and 1350 show a significant dip in bed area at z=5, corresponding to the tool joint location.

Рис. 2. Распределение доли осадочного слоя в кольцевом канале с муфтой.

### Список литературы:

1. E. Orlik, O. Bocharov., A. Gavrilov. Numerical simulation of non-Newtonian hydrodynamics in an annular channel with tool joint // J. Phys.: Conf. Ser. 1667 012149, 2020.
2. E. Orlik, Y. Ignatenko, O. Bocharov. Cutting transport simulation in a horizontal borehole near tool joints // J. Phys.: Conf. Ser. 1404 012035, 2019.

Исследования выполнены в рамках бюджетной темы ИТ СО РАН № 121031800215-4.

УДК 621.039

## К ВОПРОСУ О СВОЙСТВАХ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В РАСПЛАВАХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Осипов А.А., Асхадуллин Р.Ш.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,  
249039, Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Пульсационный характер изменения параметров системы является фундаментальным свойством многих физических процессов. Исследование пульсаций наблюдаемых величин может быть полезным, а в определенных случаях необходимым для описания и прогнозирования состояния системы [1]. В рамках данной работы приводятся результаты экспериментального и расчетного исследования пульсаций температуры в расплавах тяжелых металлов на основе свинца и висмута в условиях свободной и вынужденной конвекции. На основании анализа структурных и корреляционных функций установлено, что пульсации температуры в жидком металле связаны с его конвективным движением и характеризуются сильными

корреляциями, в частности установлено влияние эжекции водорода на структуру пульсаций. Показано, что для моделирования пульсаций температуры в расплавах тяжелых металлов могут быть использованы мультифрактальные модели [2].

### Список литературы:

1. Кебадзе Б.В. Контроль теплогидравлических параметров и диагностика состояния ядерных энергетических установок с применением статистических методов: Дис. д-ра тех. наук, ГНЦ РФ - ФЭИ. Обнинск, 2007, 284 с.
2. Павлов А.Н., Анищенко В.С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов // УФН, Т. 177, № 8, С. 859–876, 2007.

УДК 621.9

## ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ЖИДКИМ АЗОТОМ

Остапчук М.А., Шишов Д.М., Занегин С.Ю.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Промышленное внедрение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) встречает множество препятствий. Это связано как со сложностью технологий производства, так и с многими неизученными эффектами при эксплуатации. Системы на базе ВТСП устройств в большинстве случаев содержат силовые полупроводниковые преобразователи. Эти преобразователи вносят свой вклад в общую эффективность системы. При этом характеристики преобразователей значительно влияют на потери в приборах с применением ВТСП [1]. В этой связи уменьшение потерь на преобразованиях является актуальной задачей в рамках внедрения сверхпроводимости. Так как криогенное охлаждение ВТСП является необходимым условием для перехода материалов в сверхпроводящее состояние, было решено проверить - приносит ли положительный эффект использование криогенное охлаждение для полупроводниковых приборов.

В данный момент единой модели изменения свойств полупроводников с уравнениями изменений характеристик не существует. На основании многих статей делаются различные обобщения [2], однако авторы многих исследований оценивают изменение характеристик только при двух температурах – при комнатной и при температуре кипения жидкого азота [3].

Для исследования электрических свойств компонентов в широком спектре температур был разработан специальный стенд позволяющий фиксировать температуру образца закрепленного на специальном радиаторе при ручном режиме подачи жидкого азота. Тестовый сигнал подавался с помощью управляемого источника тока, изменение электрических характеристик регистрировались с помощью осциллографа-самописца. Для предотвращения образования наледи было применено вакуумирование камеры с испытуемым образцом.

В рамках статических испытаний был подтвержден линейный характер увеличения порогового напряжения всех диодов с понижением температуры. Благодаря исследованию характеристик образцов в широком температурном диапазоне был выявлен нелинейный характер изменения статических характеристик у одного из образцов. Помимо этого изменение дифференциального сопротивления некоторых образцов показало настолько существенный уровень, что при уменьшении температуры общие потери диода при тестовом сигнале существенно снижались (показано на рис. 1).

В рамках динамических испытаний была выявлена однозначная для всех диодов тенденция на уменьшение и потерь, и времени обратного восстановления диодов. В некоторых случаях время обратного восстановления снижалось на порядок.

Исходя из результатов исследования можно заключить о перспективности практического применения снижения статических и динамических потерь полупроводниковых диодов при работе со сверхпроводниковыми электрическими машинами.

В дальнейшем эффект снижения потерь в полупроводниках при криогенных температурах может быть использован для значительного снижения потерь в задачах преобразования с большими токами, без устройств на основе ВТСП. Правдоподобным преимуществом такой конфигурации перед классическим способом охлаждения будет повышенный ресурс, уменьшенное время отклика и возможность использовать меньшие компоненты в более мощных задачах. Также, гипотетически, повышая эффективность преобразования при длительном преобразовании, можно добиться энергетической целесообразности использования криогенного охлаждения.

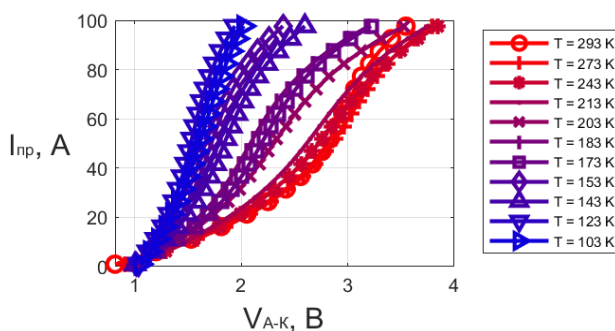


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика одного из образцов (VS-HFA140FA120) демонстрирующая существенное снижение статических потерь.

### Список литературы:

1. Zanegin, S. Y., Ivanov, N. S., Shishov, D. M., Shishov, I. M., Kovalev, K. L., Zubko, V. V. (2020). AC losses test of HTS racetrack coils for HTS motor winding. Journal of Physics: Conference Series. 1559. 012142. 10.1088/1742-6596/1559/1/012142.
2. K. Rajashekara and B. Akin, "A review of cryogenic power electronics - status and applications," 2013 International Electric Machines & Drives Conference, 2013, pp. 899-904, doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556204.
3. S. Chen, C. Cai, T. Wang, Q. Guo and K. Sheng, "Cryogenic and high temperature performance of 4H-SiC power MOSFETs," 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013, pp. 207-210, doi: 10.1109/APEC.2013.6520209.

УДК 536.2

## ТЕПЛООТДАЧА И КРИТИЧЕСКИЙ ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК НА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КИПЕНИИ В ЖИДКОМ АЗОТЕ

Павленко А.Н., Жуков В.Е., Мезенцева Н.Н.

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

Повышение эффективности, надежности и энергонапряженности теплообменных устройств является актуальной задачей в различных областях промышленности. Одним из путей повышения эффективности теплообмена является модификация теплоотдающей поверхности (ТП). Для модификации ТП применяются различные технологии (механическое резание, плазменное напыление, гальваническое осаждение и т.д.) [1, 2]. Модификация ТП посредством аддитивных технологий (3d печать) [3] является весьма перспективным направлением, поскольку позволяет организовать структуры поверхности любой сложности с высокой воспроизводимостью параметров. В данной работе приведены результаты исследования теплообмена при кипении жидкого азота на плоской латунной поверхности, модифицированной медным покрытием с использованием 3d печати.

Эксперименты проводились на 3 рабочих участках, детали которых были изготовлены на станках с ЧПУ. Теплоотдающий блок рабочего участка изготовлен из латуни ЛС59 прямоугольной формы размером 16×24 мм и толщиной 3 мм. На расстоянии 1 мм от поверхности теплоотдачи в теле блока установлены 3 полупроводниковых термометра диаметром 1.2 мм и длиной 2.5 мм. Теплоотдающий блок установлен на блоке нагревателя с 4 элементами объемного тепловыделения. Теплоизоляция рабочего участка обеспечена массивным корпусом из стеклотекстолита.

Были исследованы три ТП, из которых ТП-1 с шероховатостью  $R_z 1.25$  не имела покрытия, а ТП-2 и ТП-3 были модифицированы посредством аддитивных технологий с использованием бронзовых сферических гранул среднего диаметра 35 мкм посредством лазерного сваривания гранул. Пористость покрытия составляла 45–50%, толщина покрытия изменялась по синусоидальному закону с периодом 1500 мкм. ТП-2 имела толщину остаточного слоя (минимум синусоиды) 150 мкм, а толщину покрытия в гребнях синусоиды 300 мкм. ТП-3 имела толщину остаточного слоя 150 мкм, а толщину в гребнях 700 мкм. Гребни модифицирующего покрытия ориентированы вдоль короткой стороны ТП.

Эксперименты проводились в жидком азоте в условиях большого объема при давлении 0.1 МПа. Плотность теплового потока изменялась в диапазоне 100–330000 Вт/см<sup>2</sup>. Тепловой поток увеличивался вплоть до достижения критического значения. На ТП-1 были проведены измерения также и в области пленочного кипения вплоть до разрушения пленки. После достижения критических значений плотности теплового потока проводилось снижение тепловой нагрузки. Результаты экспериментов представлены на диаграмме (см. рис. 1) в виде зависимости  $q(\Delta T)$ , называемой “кривой кипения”.

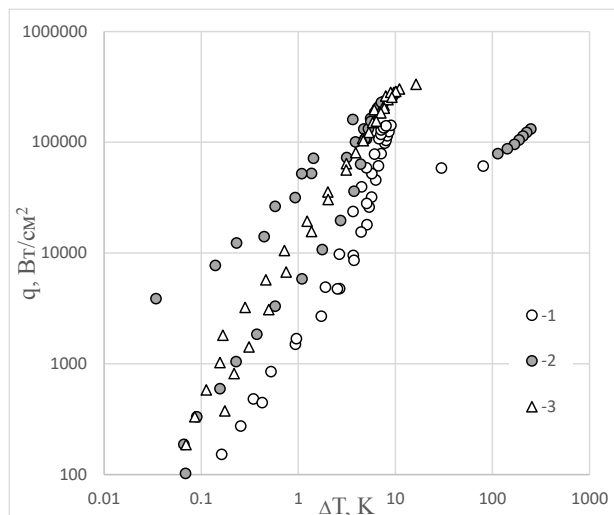


Рис. 1. Зависимость  $q(\Delta T)$  для различных ТП.  
1 – ТП-1; 2 – ТП-2; 3 – ТП-3.

Как видно на диаграмме, на не модифицированной поверхности (ТП-1) данные при увеличении плотности теплового потока и затем снижении его не значительно различаются по величине  $\Delta T$ , т.е. активация и дезактивация центров парообразования происходят быстро. На модифицированной ТП-2 наблюдается существенное различие (5–7 раз) величины температурного напора при повышении и понижении плотности теплового потока, что свидетельствует о сохранении активности центров парообразования при снижении плотности теплового потока.

Величина критического теплового потока  $q_{cr1}$  на модифицированных ТП оказалась вдвое выше, чем  $q_{cr1}$  на не модифицированной ТП. А именно,  $q_{cr1} = 15, 30$  и  $33$  Вт/см<sup>2</sup> для ТП-1, ТП-2 и ТП-3, соответственно.

## Список литературы:

1. Дедов А. В., Забиров А.Р., Федорович С.Д., Ягов В.В. Влияние углеродистого покрытия поверхности на теплообмен при нестационарном пленочном кипении // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57. № 1. С. 72–82.
2. Тovaжнянский Л.Л., Веде В.Е. Новый класс керамических материалов, обеспечивающий энергоэффективность высокотемпературных технологий: Academia de Stiinte a Moldovei. 2012. С. 78–82.
3. Баев С.Г., Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Горяев Е.П., Кастеров В.В., Смирнов К.К. Лазерная система для исследования аддитивного формообразования изделий из металлических порошков // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 5. № 1. С. 29–34.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2020-770).

УДК 536.24

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ОТРЫВНОМ ПОТОКЕ ЗА ДВУМЕРНЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

Пахомов М.А., Терехов В.И.

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

Актуальность данной работы объясняется тем, что отрыв одно- и двухфазного турбулентного потока и его повторное присоединение часто встречается в различных энергетических устройствах и в природе [1]. Одним из эффективных способов повышения эффективности теплообменного оборудования является использование оребрения стенок канала. Двухфазное течение за двумерным препятствием является одним из часто встречающихся случаев сдвигового потока при обтекании острых кромок тел. Наличие оребрения одной из стенок канала оказывают на заметное влияние на основные характеристики течения, такие как турбулентность, теплообмен и длина зоны рециркуляции. Целью настоящей работы является численное исследование испарения капель на течение, турбулентность и теплоперенос в оребренном канале.

В работе рассмотрена задача о динамике двухфазного газокapельного отрывного турбулентного потока при наличии межфазного теплообмена. При решении используются двумерные RANS уравнения, записанные с учетом обратного влияния частиц на процессы переноса в газе [2]. Для описания динамики течения и тепломассопереноса в газовой и дисперсной фазах используется эйлеров континуальный подход [3]. Турбулентность несущей фазы описывалась с использованием модели переноса компонент рейнольдсовых напряжений [4], записанной с учетом двухфазности потока.

Все численные расчеты выполнены для смеси воздуха с каплями воды на входе в канал для случая нисходящего движения двухфазного потока. На одной из стенок плоского канала установлено оребрение. В вычислительную область входило два ребра квадратного сечения высотой  $h=4$  мм. Высота канала  $H=40$  мм ( $H/h=10$ ), расстояние между ребрами  $p/h=5-12$ . Среднемассовая скорость газа перед сечением отрыва варьировалась в диапазоне  $U_{m1}=5-20$  м/с, а число Рейнольдса для газовой фазы, построенное по среднемассовой скорости газа на входе и высоте канала,  $Re_H=HU_{m1}/\nu \approx (0.6-5) \times 10^4$ . Начальный средний диаметр капель  $d_1=5-50$  мкм и их массовая концентрация  $M_{L1}=0-10\%$ . На оребренной стенке было задано граничное условие  $T_w=\text{const}=373$  К, противоположная гладкая (без установленных препятствий) стенка была теплоизолированной. На входе в расчетную область были заданы периодические граничные условия. Все расчеты выполнены для двумерного случая течения газокapельного потока.

На первом этапе было проведено сопоставление с данными измерений и численных расчетов локальной структуры течения и теплообмена для однофазного и двухфазного газодисперсного [5] потоков при наличии установленных двумерных препятствий. Получено удовлетворительное согласие с данными других авторов как для одно- и двухфазного режима течения

при обтекании двумерного препятствия. Были проведены численные расчеты локальной структуры, турбулентности и теплопереноса в оребренном плоском канале при испарении капель воды. Влияние числа Рейнольдса потока (его скорости) на максимальное число Нуссельта в двухфазном потоке  $Nu_{\max}$  теплообмена приведено на рисунке. Показано существенное увеличение теплообмена в сравнении с однофазным течением в оребренном канале при добавлении испаряющихся капель воды (до 2.5 раз) и вполне очевидно, что с ростом скорости потока наблюдается интенсификация теплообмена.

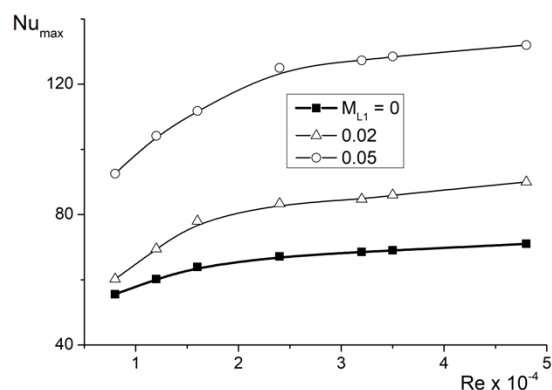


Рис. 1. Влияние числа Рейнольдса потока на величину максимального теплообмена (а) и параметр максимальной интенсификации теплообмена.

$Re=1.6 \times 10^4$ ,  $h/H=0.1$ ,  $p/h=10$ ,  $p=40$  мм,  $U_{m1}=6$  м/с,  $T_1=293$  К,  $T_w=373$  К,  $d_1=15$  мкм.

### Список литературы

1. Терехов В.И., Богатко Т.В., Дьяченко А.Ю., Смутьский Я.И., Ярыгина Н.И. Теплообмен в дозвуковых отрывных потоках. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та. 2016. 247 с.
2. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Second moment closure modelling of flow, turbulence and heat transfer in droplet-laden mist flow in a vertical pipe with sudden expansion // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 66. P. 210–222.
3. Зайчик Л.И., Козелев М.В., Першуков В.А. Расчет турбулентных газодисперсных течений в каналах с зонами рециркуляции // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 4. С. 65–75.
4. 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.
5. Grigoriadis D.G.E., Kassinos S.C. Lagrangian particle dispersion in turbulent flow over a wall mounted obstacle // Int. J. Heat Fluid Flow. 2009. V. 30. P. 462–470.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 21-19-00162).

УДК 621.9

## ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ПО ГОФРИРОВАННЫМ ЛИСТАМ УПАКОВКИ

Перепелица Б.В.

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

Широкое использование структурированных упаковок в различных промышленных применениях привело к всесторонним исследованиям их свойств и характеристик. Процессы массообмена и теплопередачи в основном определяются течением жидкости по гофрированным листам с микротекстурой. Структура потока жидкой фракции изучена недостаточно. По-видимому, чтобы продвигаться вперед необходимо четкое понимание общей картины течения на гофрированных листах в упаковках. Установлено, что даже незначительное смещение точки орошения может значительно перераспределить жидкость по упаковочным листам.

Эксперименты проводились при различных положениях точек орошения пластин и при наличии наклонной пластины на входе в упаковку при различных расходах. Расход жидкости изменялся от 0.5-15 мл/с. В качестве рабочей жидкости использовался спирт. Целью работы являлось детальное исследование механизма течения жидкости в каналах структурной упаковки при наличии наклонной пластины на входе в упаковку. Рассматривается влияние точки орошения в упаковке на растекание жидкости по упаковке (Gen2BR).

На Рис.1 представлены данные растекания струи жидкости в зависимости от положения точки орошения. Распределение жидкости в упаковке при одноточечном подводе жидкости сильно зависит от небольшого изменения точки подвода жидкости, что в значительной мере связано с расположением отверстий на пластине в этой области и кромке пластины. Известно, что растекание жидкости по поверхности листа упаковки сильно зависит от ориентации микротекстуры.

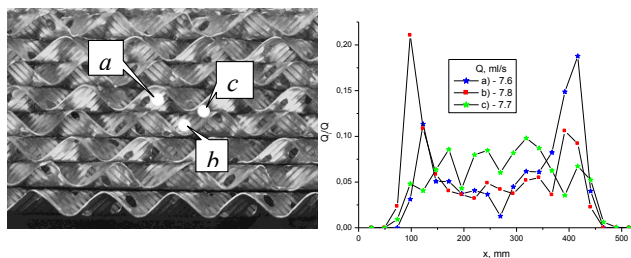


Рис. 1. Точки орошения листов и распределение жидкости на выходе из упаковки.

Для более равномерного выхода жидкости из колонны можно использовать редестребутеры в виде наклонных пластин с микротекстурой (Рис.2 а). Данные по растеканию жидкости по упаковке в зависимости от направления микротекстуры приведены на Рис.2 б.

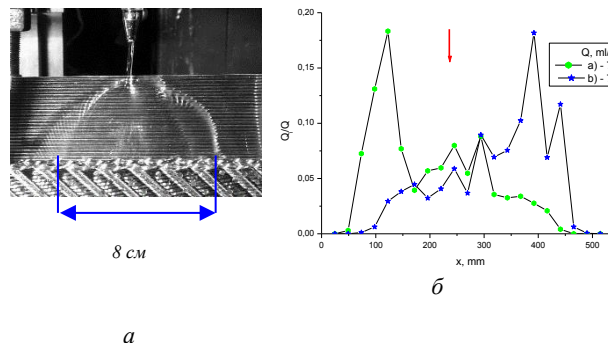


Рис.2. Растекание жидкости по листам упаковки в зависимости от направления микротекстуры.

На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

Изменение ориентации микротекстуры на листах, ребра которых направлены вниз к краю упаковки, приводит:

- а) к заметному снижению количества жидкости на торце упаковки и, следовательно, на стенке колонны
- б) к увеличению количества жидкости в пристенном слое. Неоднородность распределения жидкости под первой упаковкой главным образом связана с местом положения точек орошения. Степень неоднородности носит случайный характер и для ее оценок необходимо привлекать аппарат теории вероятностей и статистики экстремальных значений.

Убрать элементы неопределенности, связанные с положением точек орошения, можно с помощью перераспределителей в виде наклонных пластин. Это позволит регулировать подвод жидкости к ребрам, направленным в противоположные стороны и получить достаточно равномерное распределение жидкости под упаковкой.

### Список литературы:

1. Alekseenko S.V., Markovich D.M., Evseev A.R. et al. Experimental investigation of liquid distribution over structured packing // AIChE Journal. 2008. Vol. 54 I. 6 P. 1424–1430.
2. Pavlenko A., Pecherkin N., Chekhovich V. et al. Hydrodynamics in Falling Liquid Films on Surfaces with Complex Geometry // Microgravity Sci. Technol. 2009. 21. P. 207–213.
3. Pavlenko A.N., Volodin O.A., Surtaev A.S. Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // Appl. Therm. Eng. 2017. Vol. 114. P. 1265–1274.
4. Gerke S.J., Repke J.U. Experimental investigations of the fluid dynamics in liquid falling films over structured packing geometry // Chem. Eng. Res. Des. 2019. Vol. 147. P. 634–643.
5. Perepelitsa B.V. About the effect of microtexture on liquid film formation on a vertical surface // Thermophys. Aeromechanics. 2011. Vol. 18. P. 501–504.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

УДК 533.17: 541.64

## СОЗДАНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА МЕТАЛЛАХ ПУТЕМ ОБРАБОТКИ ПЛАЗМОЙ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Петрова А.В.<sup>1,2</sup>, Сафонов А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Свойства материала во многом определяются морфологией и составом его приповерхностных слоёв. Поэтому возможность изменять эти параметры позволяет придавать материалам уникальные свойства, в некоторых случаях даже не характерные им. По этой причине разработка методов и подходов к управлению строением и составом приповерхностных слоёв материала является актуальнейшей задачей современной науки и технологии. Постоянно ведётся разработка новых методов воздействия на поверхность с целью ее эффективного изменения под требуемые критерии. Простым, но эффективным методом для таких целей является использование плазмы тлеющего разряда в различной газовой среде. В результате такой обработки поверхности в её внешних слоях происходят процессы нагревания, распыления, окисления и др., что приводит к её структурированию и/или к изменению ее химического состава.

В представленной работе исследована возможность применения плазмы тлеющего разряда с целью получения развитой структурированной поверхности меди и алюминия. Исследовалось влияние различных параметров (давления газа в процессе обработки, плотности тока, времени обработки) на морфологию, состав и поверхностные свойства. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, разработанной и собранной для данного исследования. Образец, диаметром 20 мм и толщиной 2 мм из меди или алюминия размещался на катоде в вакуумной камере. После предварительной откачки в камеру через регуляторы расхода подавался рабочий газ (воздух), устанавливалось заданное давление и происходила обработка поверхности образца плазмой тлеющего разряда.

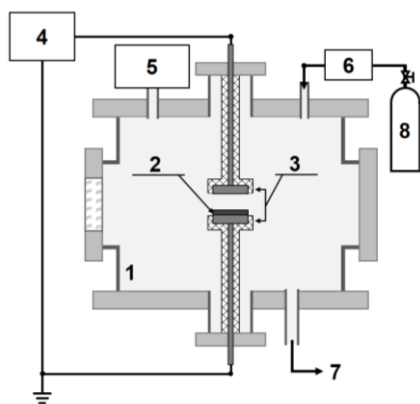


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
1 – вакуумная камера, 2 – образец, 3 – электроды,  
4 – источник постоянного тока, 5 – вакуумметр,  
6 – расходомер, 7 – вакуумный насос, 8 – подача воздуха.

После обработки для получения информации о поверхностных свойствах образцы были исследованы с помощью методов электронной микроскопии (СЭМ, EDX). Результат обработки плазмой тлеющего разряда представлен для примера на рис. 2 для медного образца (для сравнения приведена морфология образца до и после обработки). Наблюдается значительное изменение морфологии металлического образца в виде появления микро- и наноструктур.

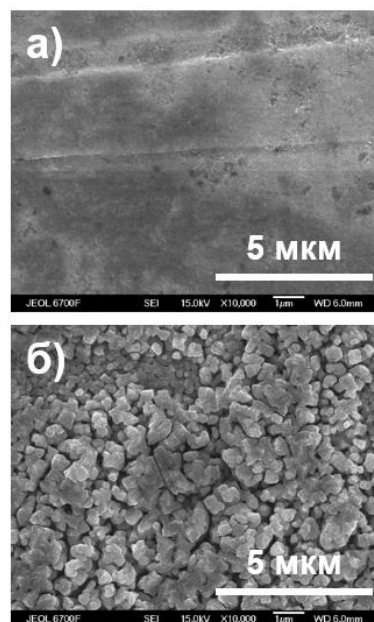


Рис. 2. Морфология поверхности медного образца:  
(а) исходный образец; (б) образец после обработки  
плазмой тлеющего разряда.

Проведённые исследования показывают возможность изменения морфологии поверхности металлов путём обработки плазмой тлеющего разряда. В результате обработки на поверхности металлов наблюдаются различные стадии их окисления, приводящие к формированию nano- и микроструктур. Установлено влияние различных параметров разряда на строение и свойства поверхности исследуемых материалов.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 18-79-10119-П).

УДК 621.9

## ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ГАЗОВ ПРИ ИХ НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ

Печенегов Ю.Я., Косов В.А.

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,  
420054, Россия, Саратов, ул. Политехническая, 77

Изменение температуры  $T$  газовых теплоносителей в процессах нагрева или охлаждения и соответственно их физических свойств приводят к переменности характеристик переноса теплоты и импульса в потоках газов на длине каналов теплопередающих устройств, а следовательно, и теплогидравлической эффективности процессов теплообмена, которая характеризуется энергетическим к.п.д. [1]

$$\eta = 1 - \frac{N}{Q} = 1 - 1/(f_1 f_2), \quad (1)$$

где  $Q$  – передаваемый тепловой поток в канале;  $N$  – мощность, затрачиваемая на перемещение потока теплоносителя;  $f_1 = \lambda/\mu$  – физический фактор;  $f_2 = C\Delta t/w^2$  – режимный фактор;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости теплоносителя;  $C$  – множитель, при ламинарном режиме течения в трубах  $C=0,545$ , при турбулентном режиме  $C=0,913Pr^{0,43}$ ;  $Pr$  – число Прандтля теплоносителя;  $w$  – скорость теплоносителя в канале;  $\Delta t$  – абсолютное значение средней разности температур стенки и потока теплоносителя.

С учетом степенных зависимостей физических свойств газов от  $T/T_0$  и принимая  $Pr = 0,7$ , для турбулентных потоков в трубах можно записать:

$$f_1 = \left(\frac{\lambda_0}{\mu_0}\right) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{(n_\lambda - n_\mu)}, \quad (2)$$

$$f_2 = 0,783\Delta t (\rho_0 d / (Re_0 \mu_0))^2 \left(\frac{T p_0}{p T_0}\right)^{-2}, \quad (3)$$

где  $n_\lambda$  и  $n_\mu$  – показатели степени в температурных зависимостях свойств;  $\rho$  – плотность газа;  $p$  – давление;  $Re$  – число Рейнольдса потока;  $d$  – диаметр трубы; индекс «0» указывает, что параметр при нормальных условиях.

Из формул (2) и (3) следует, что физический и режимный факторы качественно различно зависят от температуры. Среди природных газов наибольшая величина физического фактора у водорода, которая при нормальных условиях в 14,5 раз выше чем у воздуха.

Результаты расчетов температурных зависимостей относительных значений физического и режимного факторов (принимались  $\Delta t=1$  К,  $p=0,1$  МПа) для разных газов, полученных с использованием формул (2) и (3), приведены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что относительный физический фактор  $f_1/f_{1,0}$  увеличивается с ростом  $T/T_0$  и в большей степени для газов с высокой атомностью. Относительный режимный фактор  $f_2/f_{2,0}$  для всех газов одинаков и он уменьшается с ростом  $T/T_0$ .

На рис. 2 приведены температурные зависимости для энергетического к.п.д. процесса теплообмена разных газов, полученные расчетом по формулам (1)...(3). Принималось, что движение газов в трубе диаметром  $d=0,03$  м турбулентное,  $Re_0=idem$ .

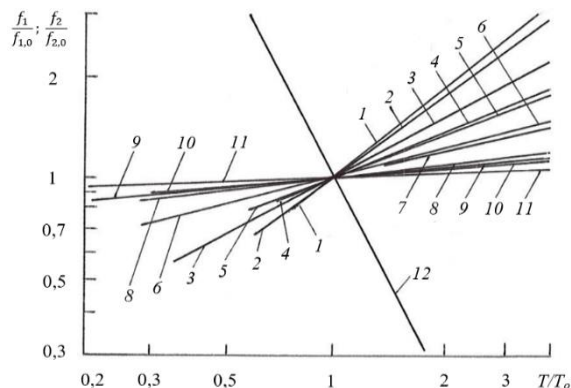


Рис. 1. Зависимости  $f_1/f_{1,0}$  (1...11) и  $f_2/f_{2,0}$  (12) от  $T/T_0$ : 1 – пропан; 2 – этан; 3 – метан; 4 – аммиак; 5 – диоксид углерода; 6 – дымовой газ; 7 – водяной пар; 8 – воздух; 9 – водород; 10 – аргон; 11 – гелий.

Из рис. 2 видно, что для газов с высокой атомностью  $\eta$  в меньшей степени зависит от температуры. При нагреве газов  $\eta$ , а следовательно, и теплогидравлическая эффективность их теплообмена уменьшаются, а при охлаждении, наоборот, увеличиваются.

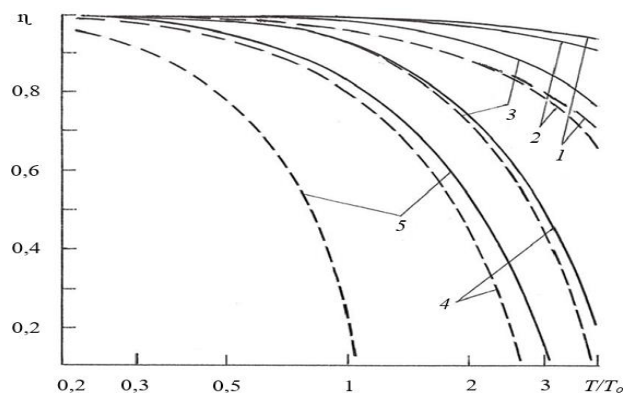


Рис. 2. Зависимости  $\eta$  от  $T/T_0$ : ----- –  $Re_0 = 10^4$ ; - - - -  $Re_0 = 2 \cdot 10^4$ ; 1 – метан; 2 – аммиак; 3 – воздух; 4 – водород; 5 – гелий.

Общий вывод состоит в том, что соотношение передаваемой теплоты и затрат энергии на прокачку теплоносителя в процессах теплообмена для газов при условии  $Re_0=idem$  наиболее благоприятно в области пониженных температур и оно ухудшается с повышением температурного уровня процессов.

Список литературы:

1. Печенегов Ю.Я. Сравнительные теплогидравлические и энергоэкономические характеристики теплообмена в круглых и прямоугольных каналах при ламинарном и турбулентном режиме течения теплоносителей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2022, № 2. С. 12–15.



УДК 536

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ ПЛОСКОЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ ШЛИРЕН МЕТОДОМ.

Пещенюк Ю.А.<sup>1</sup>, Семенов А.А.<sup>1</sup>, Айвазян Г.Е.<sup>2</sup>, Гагапова Е. Я.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup>Национальный политехнический университет Армении,  
610101, Армения, Ереван, ул. Теряна, 105

Разработка количественного метода измерения, позволяющего измерять толщину пленки жидкости и деформации ее поверхности, является особенно актуальным для макро размерных пленок. Для получения двухмерных и трехмерных характеристик быстро испаряющихся тонких пленок жидкости применяются несколько оптических методов. Таких как конфокальная микроскопия [1], интерферометрия [2] и шлирен метод [3].

В данной работе использовалась одна из модификаций шлирен – метода со ступенчатым градиентным фильтром с семью ступенями серого. Шлирен-метод с градуированным/кодирующим/ступенчатым или плавно регулируемым фильтром нейтральной плотности был изобретен Нортон в 1952 г. Использование ступенчатого фильтра обеспечивает более четкое изображение с лучшим пространственным разрешением [4]. В качестве подложки использовался черный кремний (b-Si). Оптическая схема представлена на Рис.1.

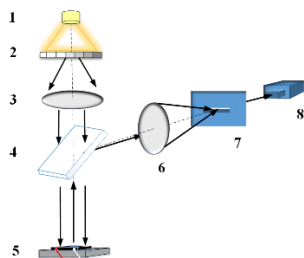


Рис.1. Оптическая схема шлирен – визуализации. 1 – источник света, 2 – ступенчатый фильтр и матовая пластинка, 3 – коллимирующая линза, 4 – лучевой делитель, 5 – система, состоящая из подложки и нагревателя, 6 – шлирен линза, 7 – шлирин фильтр, 8 – камера.

Для обработки полученных данных была разработана программа в среде Matlab. С помощью предварительной калибровки изображения в виде матриц со значениями интенсивности 256 оттенков серого были сопоставлены с характерными значениями углов (Рис. 2.). Значения измеряемых углов лежат в диапазоне [-5°, 5°]. Далее был произведен расчет толщины тонкой пленки, площади поверхности и объем методом элементарных параллелепипедов.

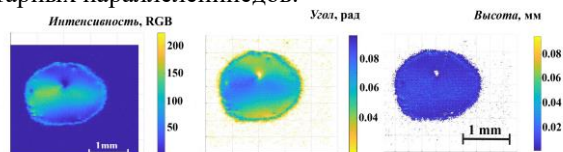


Рис. 2. Пример преобразования капли в программе в Matlab для капли воды при  $T_w = 20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Были рассчитаны профили толщины для капель воды при комнатной температуре, которые дают качественное и количественное представление о двухмерных и трехмерных деформациях поверхности. Также проведен программный расчет скорости контактной линии и удельной скорости испарения с единицы поверхности.

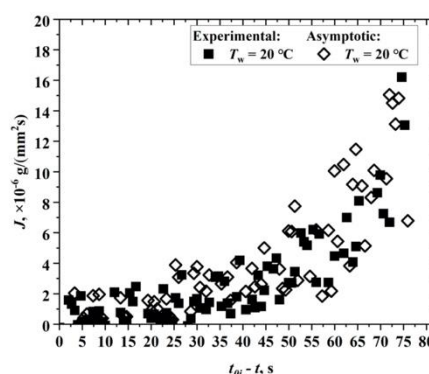


Рис.3. Удельная скорость испарения на конечной стадии испарения капель воды при различных температурах подложки. Здесь  $t_{0i}$  — общее время измерения для каждого экспериментального режима, соответственно  $t_{0i} - t$  – реальное время измерений.

Кроме того, асимптотика удельной скорости испарения на заключительном этапе была представлена в работе [5] и хорошо согласуется с данными полученными в данной работе (Рис.3.). Что свидетельствует о возможном дальнейшем применении разработанной системы измерения.

### Список литературы

- [1] Lef'evre F, et al (2010) Confocal Microscopy for Capillary Film Measurements in a Flat Plate Heat Pipe. Journal of Heat Transfer 132(3): 031,502.
- [2] Narayan L S, Srivastava A (2021) On the identification and mapping of three distinct stages of single vapor bubble growth with the corresponding microlayer dynamics. International Journal of Multiphase Flow 142:103,722.
- [3] Kabov O, et al (2001), Deformation of the free surface in a moving locally-heated thin liquid layer. Fluid dynamics 36(3):521–528
- [4] Settles GS (2001) Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media. Springer Science & Business Media.
- [5] Gataпова EYa, et al (2018) Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: Focusing on the final stage of thin droplet evaporation. Soft Matter 14:1811–1821.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 20-19-00722).

УДК 532.5

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТАНЕНЦИЛЬНОЙ КАМЕРЕ

Платонов Д.В.<sup>1,2</sup>, Сентябов А.В.<sup>1,2</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup>, Шторк С.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет,  
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

Тангенциальная вихревая камера является одним из удобных объектов для изучения разнообразных вихревых структур. В камере прямоугольного сечения наблюдали различные режимы течения, такие как коллообразный вихрь, спиральный вихрь и двойной спиральный вихрь [1]. В других экспериментальных работах переход между одиночным и двойным спиральным вихрем изучались в подобной камере круглого сечения [2, 3]. На основе последних исследований в данной работе было проведено численное моделирование различных режимов турбулентного закрученного течения в цилиндрической тангенциальной камере.

Для численного моделирования вихревого течения в тангенциальной камере была построена геометрическая модель (см. рис. 1а). Для формирования закрученного течения на входе через 12 сопел прямоугольного сечения в цилиндрическую камеру подавалась равномерно распределенный поток воды с параметрами плотности и вязкости  $\rho=998 \text{ кг/м}^3$  и  $\mu=10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Поток отводился через верхний бак прямоугольного сечения с помощью четырех круглых патрубков при условии постоянного и одинакового давления на выходах из патрубков.

Расчетная сетка (см. рис. 1б) содержала более 11 млн. Сетка состояла из кубических ячеек в объеме и призматического пограничного слоя с  $y^+ < 5$  и с переходной областью между ними. Расчет турбулентного течения проводился методом LES с подсеточной моделью WALE. Шаг по времени составлял  $4 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ , что соответствует числу Куранта  $C_{CFL} < 1$  во всей расчетной области. Использовался алгоритм SIMPLEC. Для аппроксимации конвективных членов использовалась центрально-разностная схема и неявная схема второго порядка – по времени.

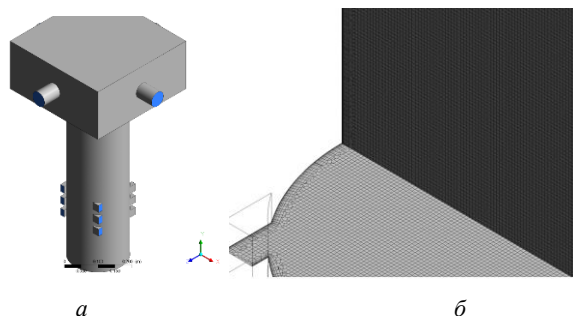


Рис. 1. 3D модель (а) и пример расчетной сетки (б) тангенциальной камеры.

Расчеты были проведены при расходе  $Q=14 \text{ м}^3/\text{ч}$ , соответствующем числу Рейнольдса  $Re=26100$ , где число Рейнольдса определялось по диаметру тангенциальной камеры и среднерасходной скорости в ней.

Закрутка потока варьировалась путем перекрытия одного или двух рядов сопел при неизменном расходе жидкости. Для этого были рассмотрены три режима (см. рис. 2): режим 1 – все 12 сопел открыты, режим 2 – перекрыт верхний ряд сопел (открыты 8 сопел), режим 3 – перекрыты верхний и средний ряды сопел (открыты 4 сопла). Согласно [1] степень закрутки в тангенциальной камере обратно пропорциональна количеству открытых сопел.

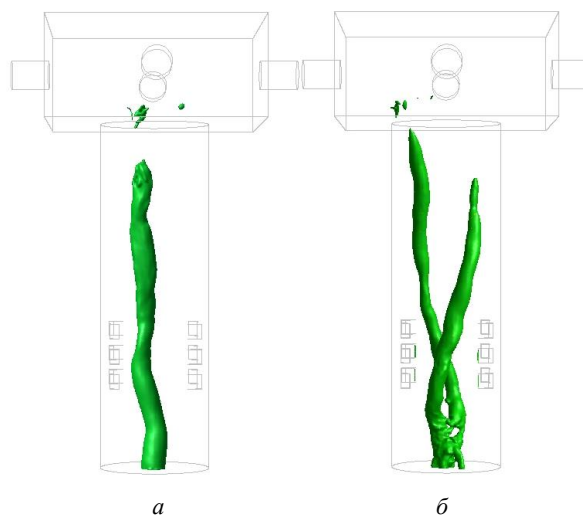


Рис. 2. Вихри в тангенциальной камере:  
а – 12 сопел открыты, б – 8 сопел открыты.

Проведенные расчеты показывают, что в определенном диапазоне параметра закрутки в тангенциальной камере формируется устойчивая двухспиральная вихревая структура, что согласуется с экспериментальными данными. В расчетах режим с двухспиральной структурой соответствует открытию 8 сопел камеры. В этом режиме спектры пульсаций давления показывают появление доминантной частоты, которая меняется пропорционально закрутке потока.

### Список литературы:

1. Alekseenko S.V., Kuibin P.A. and Okulov V.L. Theory of concentrated vortices. An introduction. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 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

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-19-00769).

УДК 536.7

## ГАЗОДИНАМИКА И ЛОКАЛЬНАЯ ТЕПЛОТДАЧА ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В ДЛИННОЙ ТРУБЕ ПРИ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Плотников Л.В., Осипов Л.Е., Следнев В.А., Шурупов В.А.

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

Известно, что газодинамическая нестационарность и степень турбулентности газовых потоков оказывают существенное влияние на интенсивность теплообмена в гидравлических системах разных конфигураций [1, 2]. При этом, тепломеханическое совершенство конструкции газоздушные тракты тепловых двигателей (дизели, газовые турбины) и компрессорной техники во многом определяет их эффективность и удельные показатели [3, 4]. Поэтому, получение достоверных, экспериментальных данных о нестационарной газодинамике и локальной теплоотдаче в трубопроводах остается актуальной задачей в науке и технике.

В данном случае исследования проводились применительно к трубе длиной один метр с внутренним диаметром 30 мм. Рабочей средой являлся воздух с температурой 20–22 °С при атмосферном давлении. Исследования проводились для стационарного и пульсирующего режимов течения воздуха в трубе. Пульсации потока создавались с помощью вращающейся заслонки с частотой от 3 до 15 Гц. Диапазон значений средней скорости  $w$  течения воздуха составлял от 5 до 70 м/с ( $10\,000 < Re < 140\,000$ ). Исследования проводились при разных начальных значениях степени турбулентности потока  $Tu$  (от 0,02 до 0,12), которые создавались посредством пластинчатых турбулизаторов.

В ходе проведения опытов определялись местные значения скорости потока воздуха  $w_x$  (термоанемометр, ниточный датчик), локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  (термоанемометр, тепловой датчик ниточного типа) и температуры потока  $t$  (микрометр, термометр). Данные с датчиков поступали в аналого-цифровой преобразователь, а далее в компьютер для обработки и анализа. Средние значения локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  и скорости потока воздуха  $w$  определялись посредством вычисления математического ожидания мгновенных значений этих величин. Измерительные приборы, методики определения физических величин и неопределенность эксперимента подробно описаны в [5].

В ходе проведения экспериментальных исследований были получены зависимости мгновенных значений местной скорости и локального коэффициента теплоотдачи стационарного и пульсирующего потоков воздуха в длинной трубе при разных начальных условиях. Установлено, что газодинамическая нестационарность вызывает рост степени турбулентности почти в 2 раза (от  $Tu \approx 0,025$  для стационарного течения до  $Tu \approx 0,05$  в случае пульсирующего потока) для трубопровода без турбулизатора. При этом, увеличение частоты пульсаций потока (от 5 до 15 Гц) фактически не оказывает заметного влияния на величину степени турбулентности  $Tu$ . Выявлено, что значения локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  на 10–40 %

выше при пульсирующем режиме течения воздуха в трубе по сравнению со стационарным случаем (рис. 1). При этом, увеличение частоты пульсаций потока приводит к дополнительному росту локального коэффициента теплоотдачи на 10–20 % (рис. 1). Это можно объяснить тем, что газодинамическая нестационарность оказывает влияние на характер развития и структуру пограничного слоя, т.е. за счет проникновения внешних возмущений в пограничный слой он теряет свою устойчивость с соответствующим ростом интенсивности теплоотдачи [6].

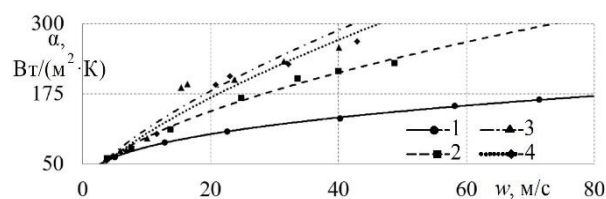


Рис. 1. Зависимости коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от средней скорости потока воздуха  $w$  в трубопроводе с турбулизаторами при разных условиях:

1 – стационарное течение ( $Tu=0,02$ ); 2 – пульсирующий поток ( $Tu=0,04, f=11$  Гц); 3 – пульсирующий поток ( $Tu=0,08, f=10,6$  Гц); 4 – пульсирующий поток ( $Tu=0,12, f=14$  Гц).

Полученные данные могут быть полезны в области теплотехники и двигателестроения. Результаты исследований могут быть использованы для оптимизации теплофизических процессов в системах газообмена и проточных частых тепловых двигателей с целью повышения их эффективности за счет тепломеханического и газодинамического совершенствования конструкций.

### Список литературы:

1. Terekhov, V.I. Heat Transfer in Highly Turbulent Separated Flows: A Review // Energies. 2021. Vol. 14. A.n. 1005.
2. Davletshin I.A., Mikheev N.I., Paereliy A.A., Gazizov I.M. Convective heat transfer in the channel entrance with a square leading edge under forced flow pulsations // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, Vol. 129. P. 74-85.
3. Reitz R.D., Ogawa H., Payri R., Fansler T. [et al.]. IJER editorial: The future of the internal combustion engine // International Journal of Engine Research. 2020. Vol. 21 (1). P. 3-10.
4. Cho S., Song C., Kim N., Oh S., Han D., Min K. Influence of the wall temperatures of the combustion chamber and intake ports on the charge temperature and knock characteristics in a spark-ignited engine // Applied Thermal Engineering. 2021. Vol. 182. A.n. 116000.
5. Плотников Л.В. Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом: монография. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун., 2020. 204 с.
6. Wang L., Salewski M., Sundén B. Turbulent flow in a ribbed channel: Flow structures in the vicinity of a rib // Experimental Thermal and Fluid Science. 2010. Vol. 34(2). P. 165-176.

Работа выполнена при поддержке программы Приоритет-2030.

УДК 536.423

## ТЕПЛООТДАЧА К ИМПУЛЬСНО НАГРЕВАЕМОМУ ВОДНОМУ РАСТВОРУ 2,6-ЛУТИДИНА И УСЛОВИЯ ЕЁ ИНТЕНСИФИКАЦИИ

Поволоцкий И.И., Волосников Д.В., Игольников А.А., Скрипов П.В.

Институт теплофизики УрО РАН,  
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Изучение переноса тепла в жидких растворах с различным типом фазовой диаграммы имеет исследовательский и практический интерес. В частности, водные растворы – это наиболее распространенные растворы в хозяйственной сфере и жизнедеятельности человека. Выбранная система 2,6-лутидин - вода обладает замкнутой областью несмесимости компонентов на фазовой диаграмме в координатах температура-концентрация и двумя критическими точками [1, 2]. Исходный компонент раствора 2,6-лутидин применяется в качестве сырья в производстве лекарственных препаратов, для получения ортоэфиров и в качестве акцептора в процессах дегидрогалогенирования.

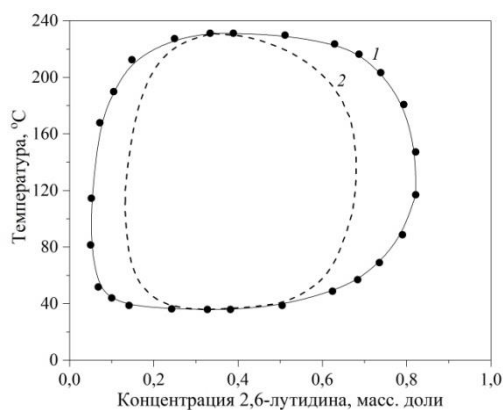


Рис. 1. Фазовая диаграмма раствора 2,6-лутидин – вода.  
1 – линия равновесия жидкость-жидкость;  
2 – диффузионная спинопаль, рассчитанная по теории Флори – Хаггинса [3].

Цель работы состояла в изучении характерных черт теплоотдачи к импульсно перегретым (относительно линии равновесия жидкость-жидкость и диффузионной спинопали) растворам в сопоставлении с теплоотдачей, наблюдаемой в чистых компонентах при одинаковых условиях опыта, в том числе, на фоне фазового перехода жидкость-жидкость и спинопального распада. Для ее достижения был применен метод управляемого импульсного нагрева проволоочного зонда, погруженного в исследуемую жидкость, а именно, режим термостабилизации при достижении температурой зонда заданного значения  $T_{st}$  [4]. Метод удобен для сопоставления коэффициентов мгновенной теплоотдачи к растворам, в том числе, в не вполне устойчивых (выше линии равновесия жидкость-жидкость) и термодинамически неустойчивых (выше диффузионной спинопали) состояниях.

В опытах показана принципиальная осуществимость измерений тепловых свойств водных растворов в не вполне устойчивых и неустойчивых состояниях. Данный результат позволяет перейти к систематическому исследованию теплопереноса на фоне спинопального распада неустойчивых систем, как наиболее естественного в данной области фазовой диаграммы релаксационного процесса. В некоторых температурно-временных условиях обнаружено превышение мгновенным коэффициентом теплоотдачи, см. соотношение (1) к распадающемуся раствору соответствующего значения чистой воды, рассматриваемого в качестве основы для сопоставления.

$$K_T = \frac{P}{\Delta T \cdot S}, \quad (1)$$

где  $P(t)$  – изменение электрической мощности во времени, необходимое для поддержания заданной температуры зонда  $T_{st}$ ;  $\Delta T$  – температурный напор, поддерживаемый постоянным на участке измерений;  $S$  – площадь поверхности зонда.

Данный результат получен сопоставлением исключительно первичных данных опыта. Его обсуждение будет построено с учетом модели, представленной в [5]. Бинарные жидкости с замкнутой областью несмесимости имеют перспективу в качестве теплоносителей в процессах, где нельзя исключить вероятность мощного локального тепловыделения. Развитие исследования будет направлено на выяснение обоснованности этой перспективы.

## Список литературы:

1. Faizullin M.Z., Skripov V.P. Investigation of the (T,p,x) surface of phase separation of  $\{x\text{H}_2\text{O} + (1-x)\text{NC}(\text{CH}_3)\text{CHCH}_2\text{C}(\text{CH}_3)\}$  in the vicinity of the line of lower critical points of dissolution // J. Chem. Thermodyn. 1991. V.23. №6. С. 561–567.
2. Wang J.G., Anisimov M.P., Sengers J. Closed Solubility Loops in Liquid Mixtures // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 2005. T. 219. № 9. С. 1273–1297.
3. Кленин В.И., Шмаков С.Л. Фазовое разделение в полимерных системах // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология. 2009. Т. 9. №2. С. 41–46.
4. Скрипов П.В., Старостин А.А., Волосников Д.В. Перенос тепла в импульсно перегретых жидкостях // ДАН. 2003. Т.390. С. 192–195.
5. Skripov P.V., Igolnikov A.A., Rutin S.B., and Melkikh A.V., Heat Transfer by Unstable Solution Having the Lower Critical Solution Temperature, Int. J. Heat Mass Transfer, 2022, vol. 184, p. 122290.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00115-П.

УДК 678.747.2

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Попов И.А.<sup>1</sup>, Константинов Д.Ю.<sup>1</sup>, Амирова Л.М.<sup>1</sup>, Жукова Ю.В.<sup>2</sup>, Чорный А.Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10

<sup>2</sup> Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 220072, Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 15

В настоящее время одной из мировых тенденций при разработке авиационных систем является замена металлических сплавов на полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые позволяют добиться значительного снижения веса изделия и повышения эксплуатационных характеристик. В частности, доля ПКМ в конструкции мотогондолы двигателя современных двигателей достигает 60%, включая корпусные детали наружного контура, многослойные сотовые панели звукопоглощающего контура, корпуса вентилятора. Такие решения были опробованы и в настоящее время используются уже в серийном производстве. ПКМ начинают использовать и для производства рабочих лопаток вентилятора и лопаток спрямляющего аппарата.

Цель исследования – определение температурной зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоемкости ПКМ.

Метод исследования – экспериментальное исследование зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоемкости ПКМ с использованием измерителя стационарного теплового потока NETZSCH HFM 446 Lambda Medium. Это прибор для определения теплофизических характеристик материалов с низкими значениями теплопроводности.

Объекты исследования – углепластиковый термопласт – 1) ПКМ ПЭЭК (Россия) (рис.1, а), 2) углепластиковый термопласт – ПКМ TENAX-E TPCL PEEK-4-40-НТА40 E13 3K DT-5HS-285/04AB (Япония) (рис.1, б), 3) волокнистый реактопласт – Аранит РУСАР С600/Т-26 (Россия) (рис.1, в), 4) углепластиковый реактопласт – ПКМ UMT-49/ Т-26 (Россия) (рис.1, г).

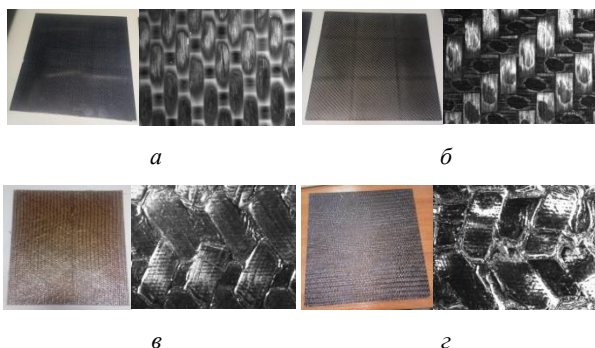


Рис.1. Исследованные образцы ПКМ.

В основном блоке исследований коэффициентов теплопроводности ПКМ, испытуемый образец помещают в прибор между двумя нагреваемыми пластинами (рис. 2).

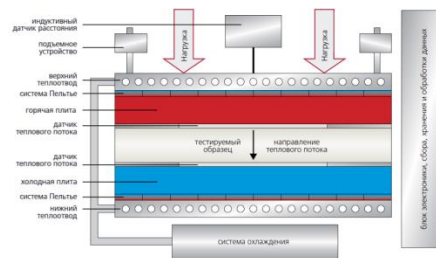


Рис.2. Схема измерителя стационарного теплового потока HFM 446 Lambda Medium.

В ходе проведения исследований получены температурные зависимости коэффициентов теплопроводности исследованных образцов ПКМ (рис.3).

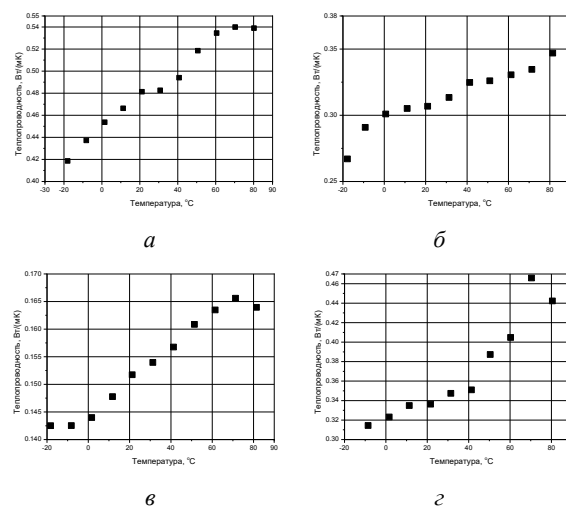


Рис.3. Температурные зависимости ПКМ: а – образец 1, б – 2, в – 3, г – 4.

В ходе исследования определены коэффициенты удельной теплоемкости, изучена кинетика процесса отверждения связующего, проведена оценка времени гелеобразования и теплостойкости отвержденного углепластика, установлены реологические характеристики связующего.

На основе полученных данных может быть сформирована база данных РФ по коэффициентам теплопроводности и удельной теплоемкости ПКМ. Результаты также позволяют проводить верификацию численных моделей теплопроводности исследованного материала с учетом его структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по выполнению обязательств по Соглашению 075-03-2020-051/3.

УДК 621.311.25

## ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ В РАСПЛАВЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Прибатурин Н.А.<sup>1,2</sup>, Лобанов П.Д.<sup>1</sup>, Светоносков А.И.<sup>1</sup>, Курдюмов А.С.<sup>1</sup>, Чинак А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

<sup>2</sup> Институт безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва,

Двухфазное течение в реакторной установке с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) может появиться при разрыве трубки второго контура в парогенераторе. При этом разрыв может быть как гильотинный, так и в виде образования микротрещины. В первом случае парогазовая среда интенсивно истекает в теплоноситель, формируя в близлежащих к месту разрыва каналах парогенератора двухфазное течение с высоким паро/газосодержанием. Наличие локальных преград для двухфазного потока может приводить к дроблению больших пузырей. При микротрещине в теплоносителе могут формироваться пузырьки малого размера. Маленькие и большие пузырьки газа в жидкости играют разные роли в двухфазном потоке. Маленькие пузырьки вносят большой вклад в увеличение межфазной поверхности и, соответственно, в результирующий межфазный перенос массы, момента и энергии, а большие пузырьки доминируют в изменении скорости дрейфа в двухфазном потоке.

Тяжелые жидкометаллические теплоносители, такие жидкий свинец или свинцово-висмутовый расплав, гораздо тяжелее воды, в результате чего отношение плотности газа к плотности жидкого металла существенно меньше, чем для системы вода – газ. Необходимо иметь данные не только о режимах двухфазного течения ТЖМТ – газ, но данные о форме и эволюции пузырей в каналах. Для расплавов металла такие данные существенно ограничены в первую очередь трудностью измерения за счет оптической непрозрачности расплава металла. Кроме того, исследования в расплаве свинца и его сплавов затруднены из-за высокой температуры и слабой проницаемости свинца для рентгеновского излучения.

Анализ известных данных указывает, что до сих пор форма пузырьков, движущихся в расплаве жидкого металла, полностью не известна, также как не известны и режимы двухфазного течения ТЖМТ – газ. Данная работа направлена на установление особенностей движения газовой фазы в вертикальном цилиндрическом канале, заполненном ТЖМТ, получение данных о влиянии расхода газовой фазы на форму и эволюцию пузырей, влиянии диаметра канала на изменение режима двухфазного потока.

Основное внимание при проведении экспериментов было уделено созданию условий для наблюдения и фиксации режимов течения двухфазной среды. Поэтому рабочие участки были изготовлены из кварцевого стекла.

В ходе экспериментов контролировались следующие параметры:

- температура теплоносителя в рабочем участке;
- расход и температура газовой фазы;

- температуры различных элементов стенда, оснащенных индивидуальными нагревателями;
- мощность, подводимая к электрическим нагревателям экспериментальной модели.

Для выполнения экспериментов были использованы три цилиндрических вертикальных рабочих участка с внутренним диаметром 8, 20 и 30 мм.

Двухфазная среда создавалась путем ввода в свинцово – висмутовый теплоноситель, находящийся при температуре 180°C инертного газа аргона. Температура ТЖМТ, а также всех элементов рабочего участка поддерживалась на одном и том же уровне в ходе всех экспериментов с точностью  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ . Диапазон расходов газа и свинцово-висмутового расплава подбирался таким образом, чтобы для каждого рабочего участка диагностировался режим течения двухфазной среды. При этом расход газа варьировался от минимально возможного, при котором в теплоносителе начинают формироваться газовые пузырьки, до максимально возможного, при котором двухфазное течение приобретало неустойчивый характер. Максимальное расходное газосодержание превышало величину 0,3.

Использование скоростной видеофиксации позволило конкретизировать особенности эволюции двухфазных режимов в системе жидкой металл – газ

В результате измерений получены данные по эволюции пузырьков газа в свинцово-висмутовом расплаве, форме пузырьков, временному изменению газосодержания и его спектру, гистограмме распределения газосодержания по величине, особенностям снарядного течения газовой фазы в расплаве металла, скорости дрейфа пузырьков в расплаве металла.

Так, например, при минимальном расходе газа в жидком металле появляются маленькие пузырьки с формой, близкой к сфероидальной. В отличие от движения газового пузырька в водяной среде, где он сохраняет свою сферическую форму, эволюция пузырька в среде расплава металла характеризуется появлением неустойчивости на поверхности пузырька, что приводит к изменению его формы. При постепенном увеличении расхода газа нестабильность формы пузырьков возрастает, пузырек не только изменяет форму при своем движении, но и меняет траекторию движения.

При увеличении расхода газа появляются пузыри большего размера в виде полусферического сегмента, заполняющей поперечное сечение канала. С увеличением расхода газа формируются газовые снаряды с нерегулярным периодом следования, интенсивными возмущениями на межфазной границе. Установлено наличие существенных флуктуации газосодержания при снарядном режиме течения.

УДК 544.454.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ГАЗОВОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ПРИ НЕДОСТАТКЕ ОКИСЛИТЕЛЯ**

**Прохоров Е.С.**

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

В [1] был предложен унифицированный подход к расчету равновесных течений реагирующих газов. Он сформулирован на основе развитой приближенной модели равновесия, которая позволяет получать численные решения при детонации газовых смесей с различными соотношениями между углеводородным топливом и окислителем. Этот подход способен адекватно описывать детонационные течения даже при недостатке кислорода, когда в продуктах сгорания может в заметных количествах появляться свободный углерод не только в газообразной, но и конденсированной фазе.

В настоящей работе унифицированный подход [1] использован для моделирования распространения самоподдерживающейся детонации в ацетиленокислородной смеси  $nC_2H_2+(n-1)O_2$ , в том числе и для значений молярной доли (концентрации) топлива  $n \geq 0.5$ , т.е. при недостатке  $O_2$ . На рис. 1 представлены расчетная зависимость скорости детонации Чепмена – Жуге  $D_* = D_*(n)$ . Предполагается, что смесь перед инициированием детонации находится при стандартных условиях: давлении  $p_0 = 1$  атм и температуре  $T_0 = 298.15$  К. Здесь же на рисунке приведены данные измерения (обозначены точками) скорости детонационного фронта детонации в переобогащенных ацетиленом смесях с кислородом [2]. Видно, что численное решение достаточно хорошо описывает экспериментальные данные. По крайней мере, в интервале  $0.5 < n < 0.83$  их расхождение не превышает  $1 \div 3$  %.

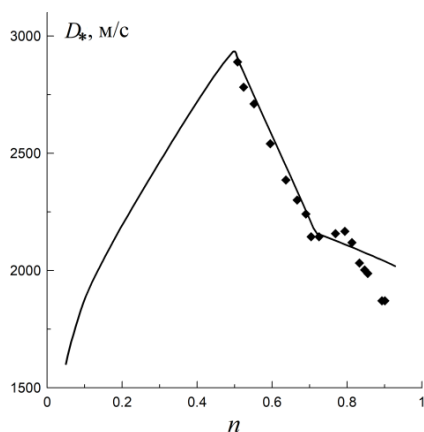


Рис. 1.

На рис. 2 можно проследить за изменением давления  $p_*$  (а) и температуры  $T_*$  (б) в продуктах сгорания на детонационном фронте при варьировании  $n$  в смеси. На представленных графиках, как и на кривой функциональной зависимости  $D_* = D_*(n)$ , имеются две точки изгиба. В одной из них, при  $n = 0.5$  (эквивалентная ацетиленокислородная смесь) параметры

детонации Чепмена – Жуге достигают экстремальных значений. Другая точка изгиба при  $n = 0.71$  соответствует началу фазового перехода в углеродных частицах, которые при меньших значениях  $n$  находятся в жидком состоянии, а при больших значениях — в частично расплавленном состоянии. С ростом  $n$  степень их проплавления уменьшается, а температура продуктов детонации (рис. 2, б) при фазовом переходе остается постоянной:  $T_* = 3100$  К

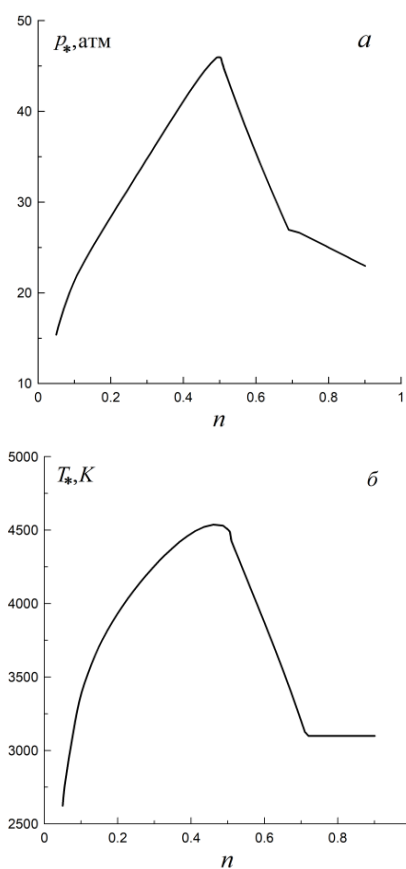


Рис. 2.

Используя эти расчеты, можно в дальнейшем в соответствии с [3] построить автомодельное решение, т.е. описать распределение газодинамических параметров продуктов детонации за фронтом плоской волны, распространяющейся от жесткой стенки.

**Список литературы:**

1. Prokhorov E.S. On melting temperature of carbon produced in detonation combustion of acetylene // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. 2233, 012003.
2. Батраев И.С., Васильев А.А., Ульяницкий В.Ю. и др. Исследование газовой детонации переобогащенных смесей углеводородов с кислородом // ФГВ. 2018. Т. 54, № 2. С. 89–97.
3. Физика взрыва / Ф.М. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др.; Под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975. 704 с.

УДК 532.13

## ЗАДАЧА РЭЛЕЯ – БЕНАРА В МОДЕЛЯХ РЕЛАКСИРУЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Пухначев В.В.<sup>1,2</sup>, Фроловская О.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Задача об устойчивости равновесия горизонтального слоя жидкости, подогреваемой снизу является классической задачей теории конвективной устойчивости [1]. Этой задаче и ее обобщениям посвящено множество работ, где уравнение импульса имеет вид уравнения Навье-Стокса с добавлением силы плавучести. Авторам неизвестны работы, в которых аналог задачи Рэлея-Бенара изучается для моделей релаксирующих жидкостей. Такие модели используются при описании движения водных растворов полимеров (см. [2] и имеющиеся там ссылки). Модель Войткунского-Амфилохиева-Павловского (1970) основана на аналогии с наследственными моделями теории упругости, она содержит два эмпирических параметра – релаксационную вязкость и время релаксации касательных напряжений. В ее асимптотическое упрощение (Павловский, 1971) входит лишь релаксационная вязкость. Оказалось, что уравнения модели Павловского с точностью до младших членов совпадают с уравнениями жидкости второго порядка (Ривлин – Эриксен, 1964).

Простейшим вариантом задачи Рэлея – Бенара является предложенная Рэлеем ее модификация, когда нижняя граница слоя является свободной. В этом случае спектральная задача сводится к решению квадратного уравнения для определения декремента возмущений. Аналогичный результат справедлив и для соответствующих задач в моделях Павловского и Ривлина-Эриксона. В модели трех авторов добавляется третья, быстро затухающая мода. Анализ исходной спектральной задачи для системы уравнений 6-го порядка показал, что учет релаксационных членов не привел к существенному изменению характеристик устойчивости.

### Список литературы:

1. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М: Наука, 1972. 392 с.
2. Frolovskaya O.A., Pukhnachev V.V. Analysis of the Models of Motion of Aqueous Solutions of Polymers on the Basis of Their Exact Solutions// Polymers. 2018. Vol. 10. 684. doi: 10.3390/polym/10060684.



УДК 536.248

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ КРИООБЕСПЕЧЕНИЯ ВТСП УСТРОЙСТВ

**Равикович Ю.А., Холобцев Д.П., Ермилов Ю.И., Федоров А.А., Иванов И.Г.**

ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе 4

Более подробное рассмотрение элементов расчетных схем математических моделей путем учета геометрии теплообменных аппаратов и магистралей, внешних теплопритоков через теплоизоляцию и потребных запасов рабочего тела позволяют увеличить точность математических моделей и перейти к определению массо-габаритных характеристик исследуемых систем.

В МАИ проведены усовершенствования имеющихся математических моделей расходной и безрасходных систем криообеспечения.

Усовершенствование расходной системы криообеспечения

Данная система холодопроизводительностью 3,3 кВт предназначена для поддержания температуры жидкого азота после снятия теплопритоков с генератора, электродвигателя и ВТСП (высокотемпературных сверхпроводящих) трасс на уровне 70–71 К.

Более тщательному рассмотрению в данной системе подвергся основной элемент схемы – криостат с расположенным в нем теплообменником-переохладителем. В криостате охлаждение азота в рабочем контуре осуществляется кипением жидкого азота вокруг стенок трубок теплообменника-переохладителя. Для поддержания заданного уровня температур азота в криостате осуществляется поддержание соответствующего значения давления путем откачки паров вакуумным насосом.

Для эффективного функционирования теплообменника-переохладителя требуется, чтобы теплообменник был всегда полностью погруженным в жидкий азот. Для расчета необходимых для этого условий произведено уточнение структурного блока теплообменника-переохладителя с криостатом и добавлен блок бака подкачки. Добавление данных структурных блоков позволяет вычислить расход испарившегося азота в криостате за счет теплопритоков от рабочего контура и теплоизоляцию и, в соответствии с этим, необходимый расход азота из бака подкачки для компенсации потерь. При этом вычисляется потребное количество азота, необходимого для функционирования системы в течение заданного времени работы. Это, в совокупности с выбором различных материалов (сталь, композит) узлов криоконтура, позволяет перейти к определению массо-габаритных характеристик системы.

Усовершенствование безрасходной системы криообеспечения

Данная система представляет собой неоновый криорефрижератор холодопроизводительностью 1,5 – 2,5 кВт, охлаждающий контур жидкого азота до температуры 67...70 К.

При уточнении математической модели безрасходной СКО вместо граничных условий на теплообмен-

нике нагрузки, моделирующих азотный контур системы, добавлены структурные блоки моделирующие гидравлику контура - циркуляционный насос и магистраль.

Кроме того, доработке подверглись блоки рекуперативного теплообменника и теплообменника нагрузки. Это позволило более точно учитывать теплообмен и гидравлические потери в теплообменниках и учитывать эффективность теплопередачи между неоновым и азотным контурами. В частности, в блоках теплообменников стало возможным более подробно задавать внутреннюю геометрию, что позволяет уточнить потери давления, падение давления в неоновом контуре за счет захлаживания и массо-габаритные характеристики теплообменников.

Добавление элементов азотного контура и учет внутренней структуры теплообменных аппаратов позволяют повысить точность расчета распределения параметров по системе, определить эффективность СКО в целом и оценить ее массо-габаритные характеристики.

### Список литературы:

1. Антюхов И.В., Волков Э.П., Джафаров Э.А., Фирсов В.П., Ракитин А.С., Балабошко Н.Г. Система криообеспечения силового ВТСП трансформатора. Инновационные технологии в энергетике. Кн.3 Прикладная высокотемпературная сверхпроводимость, М., Наука, 2016, с. 115–127.
2. Оносовский В.В. Моделирование и оптимизация холодильных установок: Учеб. пособие. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1990. 208 с.
3. Татаренко Ю.В. Математическое моделирование процессов холодильных систем: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО; ИХиБТ, 2015. – 47 с.
4. Лавров Н.А. Математическое моделирование низкотемпературных систем: учебное пособие. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, – 143 с.
5. Anghel, A., et al., Design, Construction and Operation of a Neon Refrigeration System for a HTS Power Transmission Cable, in Advances in Cryogenic Engineering 45, Academic / Plenum Publishers, New York, 2000, pp. 1419–14426.
6. Breedlove, J.J., et al., Cryocooler for Air Liquefaction Onboard Large Aircraft, in Advances in Cryogenic Engineering 53, edited by J.G. Weisend II, et al., AIP Press, Melville, New York, 2008, pp. 838–845.
7. Антюхов И.В., Волков Э.П., Карпышев А.В., Костюк В.В., Фирсов В.П. Теплообмен и гидродинамика в системах криообеспечения силовых ВТСП кабелей. Инновационные технологии в энергетике, РАН.- м.: Наука, 2010, 99...130 с.
8. Hirani H. B at all Development of a cryogenic turbo-expander with magnetic bearings. In Advances in Cryogenic Engineering, 2010, v.55, p. 895...902.
9. Yoshida S. and all New design of neon refrigerator for HTS power machines, Advances in Cryogenic Engineering Transactions of the Cryogenic Engineering Conference CEC, Vol.55, 2010, pp 1131...1138.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-15-2020-770).*

УДК 536.23

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ NOVES 7000 В ПАРОВОЙ ФАЗЕ

Расчектаева Е.П., Станкус С.В.

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

Noves 7000 – альтернативный хладагент нового поколения. Он используется в качестве теплоносителя, рабочего тела для органического цикла Ренкина и в качестве чистящего средства. Noves 7000 имеет химическую формулу  $CF_3CF_2CF_2OCH_3$  и представляет собой высокофторированный метиловый эфир. Он также известен как RE-347mcc, HFE-7000, гептафторпропилметиловый эфир, гептафтор-1-метоксипропан. Эта жидкость соответствует критериям хладагента нового поколения со значительно низким GWP=530 (потенциал глобального потепления) и нулевым ODP (потенциал разрушения озонового слоя). Кроме того, Noves 7000 негорюч, малотоксичен и не вызывает коррозии [1]. Типичные физические свойства Noves 7000: молярная масса 200,067 кг/кмоль, температура кипения 307,2 К, критическая температура 437,7 К, критическое давление 2,4782 МПа, критическая плотность 530 кг/м<sup>3</sup> [2].

В данной работе теплопроводность теплоносителя Noves 7000 измерялась стационарным методом коаксиальных цилиндров в паровой фазе в диапазонах температур 323–380 К и давлений 0,10–0,27 МПа на 5 изотермах. Методика измерений и проведение эксперимента подробно описаны в [3, 4]. Измерительная ячейка состояла из двух вертикальных коаксиальных никелевых цилиндров: внешнего длиной 140 мм и внутреннего длиной 101,3 мм. Ширина кольцевого зазора между цилиндрами равнялась  $0,366 \pm 0,005$  мм. Для измерения температуры цилиндров и разности температур между ними использовались медь-константановые термодатчики. Влияние свободных концов на значения теплопроводности учитывали введением соответствующих поправок [3]. Установка была откалбрована на 99,998 об. % чистого аргона. Расхождение с эталонными данными не превышало 1%. Перед экспериментом установка вакуумировалась до давления 1,5–2,0 Па. Погрешность экспериментальных данных по теплопроводности составляла 1,5–2,5%, по температуре – 0,05 К, по давлению – 4 кПа.

На рис. 1 приведены результаты измерений теплопроводности в паровой фазе в виде квазиизотерм. Как видно из графика, теплопроводность на изотермах увеличивается практически линейно с ростом давления. Обработка результатов измерений выполнялась эмпирической зависимостью от температуры и давления:

$$\lambda(T, p) = a_0 + a_{10} \frac{T}{100} + a_{20} \frac{100}{T} + p \left( a_{11} \frac{T}{100} + a_{21} \frac{100}{T} \right) + p^2 \left( a_{12} \frac{T}{100} + a_{22} \frac{100}{T} \right),$$

где  $T$  – в К,  $p$  – в МПа,  $\lambda$  – в мВт/(м·К).

Также на рис. 1 представлены результаты корреляции теплопроводности Noves 7000 из [5]. Эта широкодиапазонная корреляция была разработана на основе экспериментальных данных, полученных с погрешностью 1,5–3% для паров и разреженного газа. Теплопроводность в корреляции [5] представляет собой сумму идеально-газового вклада, избыточного вклада и критического прироста. Погрешность корреляции в газовой фазе оценивается в 4,2%. Сравнение наших экспериментальных данных с корреляцией [5] показывает расхождения 1,99–6,92 % и стандартное отклонение 2,35 %. Необходимые для расчетов критические параметры и плотность в заданных точках взяты в [2].

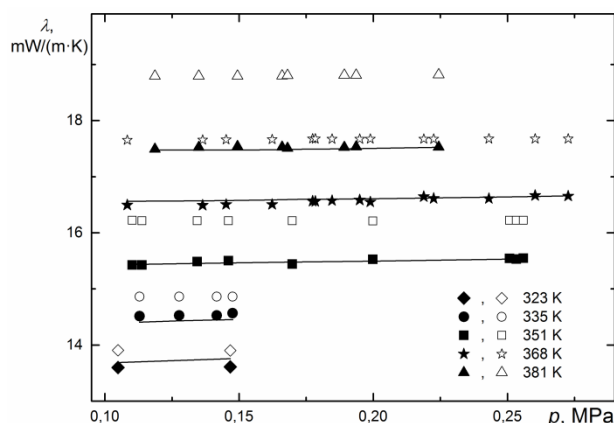


Рис. 1. Изотермы теплопроводности пара Noves 7000: заполненные символы – экспериментальные данные; пустые символы – корреляция [6]; линии – уравнение (1).

### Список литературы:

- 3M Noves 7000 Engineered Fluid, <https://multimedia.3m.com/mws/media/1213720/3m-noves-7000-engineered-fluid-tds.pdf>, 2018.
- Сухих А.А., Закопырин М.А., Утенков В.Ф. Уравнение состояния вириального типа и таблицы термодинамических свойств альтернативного хладагента HFE-347mcc // Холодильная техника, 2007. № 5. С. 22–28.
- Верба О.И., Груздев В.А. Теплопроводность гептафторпропана HFC 227ea // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9. № 3. С. 467.
- Верба О.И., Расчектаева Е.П., Станкус С.В. Экспериментальное исследование теплопроводности хладагента R-407C в паровой фазе // ТВТ. 2012. Т. 50. № 2. С. 218.
- Perkins, R.A., Huber, M.L., Assael, M.J. Measurement and Correlation of the Thermal Conductivity of 1,1,1,2,2,3,3-Heptafluoro-3-methoxypropane (RE-347mcc), *Int. J. Thermophys.*, 2022, 43, Art. no. 12. <https://doi.org/10.1007/s10765-021-02941-7>.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Российской Федерацией в лице Минобрнауки России соглашение № 075-15-2020-770.

УДК 539.1.043

## СИНТЕЗ СУПЕРГИДРОФИЛЬНЫХ ПЛЕНОК $Al_2O_3$ МЕТОДОМ НАНОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ АЛЮМИНИЯ В ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОМ ФОНОВОМ ГАЗЕ

Родионов А.А.<sup>1</sup>, Шухов Ю.Г.<sup>1</sup>, Мельник А.В.<sup>1,2</sup>, Васильев М.М.<sup>1,2</sup>, Старинский С.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630073, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова 2

Интерес к контролируемому изменению свойств смачиваемости, в частности получение супергидрофильных и супергидрофобных покрытий, существенно возрос за последние 20 лет [1]. Супергидрофильные покрытия имеют широкую область применения: повышение эффективности сбора воды [2], антизапотевание [3], предотвращение обрастания поверхностей биоорганизмами [4], в биооборудовании, например: снижение сопротивления катетеров, глазных линз и т.д. [5].

Гидрофильная поверхность при воздействии окружающей среды стремится достичь своей минимальной энергии (наиболее стабильного состояния) за счет мгновенных изменений на поверхности, например, адсорбции молекул воды или органических соединений. Таким образом, загрязнение гидрофильной поверхности и, соответственно, снижение поверхностной энергии происходит естественным образом для многих материалов, что является серьезной проблемой при их использовании [1]. Второй проблемой является зависимость смачиваемости как от состава покрытия, так и от его шероховатости (уравнение Вензеля):

$$\cos \theta_{rough} = r \cos \theta$$

где,  $\theta_{rough}$  – контактный угол смачивания,  $r$  – параметр шероховатости,  $\theta$  – равновесный контактный угол, который был бы измерен на плоской поверхности того же твердого тела. Фактически  $\theta$  определяется “химией” поверхности. Соответственно нельзя добиться критических значений смачиваемости, если исходно выбран гидрофобный материал. Грубое текстурирование может привести к растрескиванию поверхности образца [6]. Деликатные методы текстурирования (химическое, плазменное травление) могут приводить к помутнению поверхности образца [7].

Еще один метод управления смачиваемостью – изменение пористости подложки [8]. Связывание нанопористых структур может происходить между водой и группами -ОН, в результате чего поверхность становится супергидрофильной [9]. Одним из способов получения гидрофильных пористых структур является импульсная лазерная абляция (ИЛА).

Опираясь на ранее полученные данные [10], мы выдвигаем гипотезу о возможности создания супергидрофильных покрытий методом лазерного осаждения в активной газовой фазе. Импульсная лазерная абляция [11] обладает рядом преимуществ таких как вариативность в выборе материалов и сред, высокая локальность и чистота. Кроме того, ИЛА позволяет тонко контролировать процесс осаждения. Возможности метода заметно расширяются при его реализации в атмосфере фонового газа [12]. Контроль давления и состава фонового газа в свою очередь позволит изменять состав и пористость синтезируемых покрытий.

В качестве используемого материала нами был выбран оксид алюминия  $Al_2O_3$ . Перспективность его использования обусловлена его инертностью, что будет препятствовать загрязнению гидрофильной поверхности, и прозрачностью. Прозрачные гидрофильные материалы применяются для покрытия стекол зданий и транспортных средств, оптических приборов, солнечных панелей [13].

В данной работе лазерное осаждение осуществлялось с помощью второй гармоникой Nd:YAG лазера с длиной волны 532 нм и длительностью импульса на полуширине 8 нс. Проведен синтез пленок  $Al_2O_3$  методом ИЛА в фоновом кислороде при различном давлении. Установлено наличие супергидрофильных свойств пленок. Проанализированы состав, толщина и коэффициент пропускания пленок.

### Список литературы:

1. Drelich J., Marmur A. Physics and applications of superhydrophobic and superhydrophilic surfaces and coatings // Surf. Innov. 2014. Vol. 2, № 4. P. 211–227.
2. Zhai L. et al. Patterned superhydrophobic surfaces: Toward a synthetic mimic of the namib desert beetle // Nano Lett. 2006. Vol. 6, № 6. P. 1213–1217.
3. Nie M. et al. Superhydrophilic anti-fog polyester film by oxygen plasma treatment // 4th IEEE Int. Conf. Nano/Micro Eng. Mol. Syst. NEMS 2009. 2009. P. 1017–1020.
4. Baier R.E. Surface behaviour of biomaterials: The theta surface for biocompatibility // J. Mater. Sci. Mater. Med. 2006. Vol. 17, № 11. P. 1057–1062.
5. Waller L. et al. Clean Intermittent Catheterization in Spinal Cord Injury Patients: Long-Term Followup of a Hydrophilic Low Friction Technique // J. Urol. 1995. Vol. 153, № 2. P. 345–348.
6. Starinskiy S. V. et al. Formation of periodic superhydrophilic microstructures by infrared nanosecond laser processing of single-crystal silicon // Appl. Surf. Sci. Elsevier, 2020. Vol. 512. P. 145753.
7. Stinson L.J., Howard J.A., Neville R.C. Sulfur Hexafluoride Etching Effects in Silicon // J. Electrochem. Soc. 1976. Vol. 123, № 4. P. 551–555.
8. Tettey K.E., Dafinone M.I., Lee D. Progress in Superhydrophilic Surface Development // Mater. Express. 2011. Vol. 1, № 2. P. 89–104.
9. Carp O., Huisman C.L., Reller A. Photoinduced reactivity of titanium dioxide // Prog. Solid State Chem. 2004. Vol. 32, № 1–2. P. 33–177.
10. Rodionov A.A. et al. Deposition of oxide nanostructures by nanosecond laser ablation of silicon in an oxygen-containing background gas // Thermophys. Aeromechanics. 2021. Vol. 28, № 4. P. 549–554.
11. D. Bauerle. Laser Processing and Chemistry. 2013. 788 p.
12. Жуков В.П., Булгакова Н.М. Роль фонового газа в нагреве металлических образцов фемтосекундными // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Vol. 16, № 2. P. 177–188.
13. Surekha K., Sundararajan S. Self-cleaning glass // Anti-Abrasive Nanocoatings: Current and Future Applications. Elsevier Ltd, 2014. 82–103 p.

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского научного фонда,  
проект № 18–79–10119.*

УДК 538.9

## АКТИВАЦИОННЫЙ БАРЬЕР КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЕРЕОХЛАЖДЁННОЙ ЖИДКОСТИ: МЕТАДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Розанов Е.О.<sup>1,2</sup>, Проценко С.П.<sup>1</sup>, Байдаков В.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Переохлажденная жидкость обладает конечным временем жизни. Переход системы из метастабильного состояния в состояние стабильного равновесия происходит путем случайного образования и последующего роста зародыша новой (кристаллической) фазы. В классической теории частота стационарного зародышеобразования (число жизнеспособных зародышей, образующихся в единице объема за единицу времени) определяется, как

$$J = \rho_l Z D \exp(-W_c / k_B T) \quad (1)$$

где  $\rho_l$  – числовая плотность жидкости,  $Z$  – фактор Зельдовича,  $D$  – коэффициент диффузии зародышей,  $W_c$  – работа образования критического зародыша,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

Работа образования критического зародыша – это энергия, необходимая для преодоления активационного барьера кристаллизации. Рассчитать величину барьера кристаллизации можно с помощью метода метадинамики через построение ландшафта свободной энергии системы в пространстве коллективных переменных [1]. Это достигается путем добавления к гамильтониану системы гауссианов энергии, выводящих ее из состояния локального равновесия.

### Параметры моделирования

Исследована кристаллизация Леннард-Джонсовской (ЛД) жидкости из 5324 частиц при давлениях  $p = -0.995, 0$  и  $6.912$  (в единицах  $\epsilon/\sigma^3$ , где  $\epsilon$  и  $\sigma$  – параметры ЛД потенциала) и различной температуре, а также при температурах  $T = 0.55, 0.7$  и  $0.865$  (в единицах  $\epsilon/k_B$ ) при различных давлениях.

В качестве коллективных переменных для метадинамического моделирования были использованы параметр Стейнхардта [2], рассчитываемый для 350 частиц вокруг случайно выбранного атома, а также потенциальная энергия системы. Ширина гауссианов –  $0.01$  и  $40\epsilon$  для параметра Стейнхардта и энергии системы соответственно, высота –  $1.5 k_B T$ , частота добавления – каждые 100 шагов моделирования.

Расчеты проводились в пакете LAMMPS [3], метадинамическое моделирование осуществлялось с помощью библиотеки PLUMED [4]. Для каждого состояния регистрировалось до 60 актов кристаллизации.

### Результаты

Полученные данные  $W_c/T$  сопоставлены с результатами их расчета из классической теории зародышеобразования по значениям частоты  $J$  [5], вычисленными методом среднего времени жизни.

Рис. 1 иллюстрирует высоту барьеров кристаллизации для температуры  $T = 0.7$ , а также высоты барьеров, полученные из частоты зародышеобразования [5]. Данные согласуются в пределах погрешности их определения. Были получены новые данные о высотах барьеров кристаллизации при слабом переохлаждении ( $J \sim 10^{-20}$ ).

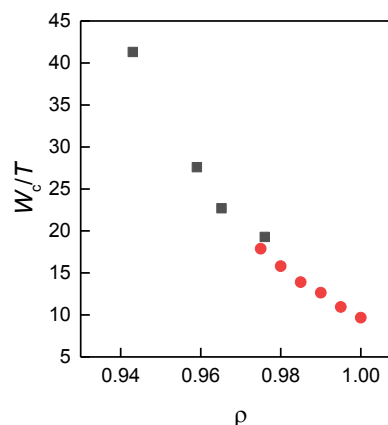


Рис. 1. Приведенные высоты активационных барьеров кристаллизации для  $T = 0.7$  в зависимости от плотности жидкости. Квадраты – данные этой работы, круги – данные [5].

### Список литературы:

1. Laio A., Parrinello M. Escaping free-energy minima // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2002. V. 99, No. 20. P. 12562–12566.
2. Steinhardt P.J., Nelson D.R., Ronchetti M. Bond-orientational order in liquids and glasses // Phys. Rev. B. 1983. V. 28, No. 2, P. 784–805.
3. Thompson A.P., Aktulga H.M., Berger R., Bolintineanu D.S., Brown W.M., Crozier P.S., in't Veld P.J., Kohlmeyer A. Moore S.G., Nguyen T.D., Shan R., Stevens M.J., Tranchida J., Trott C., Plimpton S.J. LAMMPS – a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales // Comp. Phys. Comm. 2022. V. 271. P. 108171
4. The PLUMED Consortium. Promoting transparency and reproducibility in enhanced molecular simulations // Nat. Methods. 2019. V. 16, No. 7. P. 670–673.
5. Baidakov V.G., Protsenko K.R. Spontaneous Crystallization of a Supercooled Lennard-Jones Liquid: Molecular Dynamics Simulation // J. Phys. Chem. B. 2019. V. 123, No. 38. P. 8103–8112.

Работа поддержана РФФИ (грант № 20-48-660027 p\_a).

Авторы благодарят Институт математики и механики имени Н. Н. Красовского УрО РАН за предоставление ресурсов суперкомпьютера «Уран» для проведения расчетов.

УДК 536.24

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РОСТА ОДИНОЧНОГО ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Роньшин Ф.В.<sup>1,2</sup>, Tadrist L.<sup>2</sup>, Кабов О.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Aix-Marseille Université, Laboratoire IUSTI, 13453, France, Marseille, rue Enrico Fermi, 5

Кипение – это сложный процесс, используемый во многих приложениях, таких как преобразование энергии, химическая промышленность, космическая индустрия и другие. Целью данного исследования является изучение механизмов теплопередачи, возникающих при кипении. Гравитация является одним из важных параметров, поскольку плотности жидкостной и паровой фазы отличаются практически на три порядка. Для решения этой задачи реализована программа исследований кипения в условиях микрогравитации и поддержана Европейским космическим агентством [1]. Уже несколько лет международная научная группа работает над этой задачей, чтобы получить новые данные о кипении в очень простом случае. Эталонный эксперимент RUBI (Reference mUltiscale Boiling Investigation) был создан и испытан на Земле в конце 2018 года и в июле 2019 года доставлен на Международную космическую станцию. Детальное описание эксперимента представлено в [2].

Разработана методика автоматического анализа изображений эксперимента. Алгоритм анализирует форму пузыря, вычисляет его диаметр, диаметр контактной линии и контактный угол. Анализ включает в себя следующие этапы: нахождение базовой линии, определение контура пузыря, определение параметров пузыря с использованием различных аппроксимаций. При отсутствии внешних сил пузырек имеет сферическую форму. На рис. 1(а) показан пример процесса нуклеации пузыря при  $t = 0$  с на точку нуклеации начинает воздействовать лазерный импульс длительностью 20 мс. Пузырь формируется между 8 и 10 мс после импульса. При образовании пузырька испарение происходит на достаточно большой площади перегретой поверхности (больше, чем линия контакта стабилизированного пузырька). Сразу после образования пузырек имеет эллиптическую форму, вытянутую вдоль горизонтальной оси. Затем, под действием сил поверхностного натяжения, пузырек стремится приобрести сферическую форму. Колебания возникают под действием сил инерции и поверхностного натяжения при вытягивании пузырька вдоль вертикальной или горизонтальной оси. Это может привести к отрыву пузыря от поверхности. При отрыве пузыря в центре нуклеации (каверне) остается пар, в результате чего сразу же образуется новый пузырек. Когда новообразованный пузырек достигает размеров, достаточных для того, чтобы коснуться оторвавшегося пузыря, происходит слияние. Центр масс пузыря после слияния смещается, пузырек приближается к поверхности. При увеличении времени ожидания процесс стабилизации формы пузырьков ускоряется в несколько раз. При повышении давления отрыва пузырьков не наблюдается.

Исследована динамика роста пузыря в зависимости от теплового потока ( $q$ ), давления ( $P$ ), степени недогрева

( $T_{sub}$ ) и времени ожидания ( $t_{wait}$ ). На рис. 1(б) показаны 3 характерных этапа. Первый, от 0 до 40-110 мс, представляет собой зону, в которой наблюдается быстрый рост пузырьков под действием лазерного импульса. Пузырек при этом деформирован. Вторая зона является переходной, как правило, она длится 1-2 с, для этого случая показатель степени равен 0,45-0,54. И третья зона, когда показатель степени увеличивается, для этого случая до 0,58-0,69. На рисунке также показана динамика роста пузырьков в зависимости от времени ожидания. Диаметр пузыря существенно увеличивается с увеличением времени ожидания за счет того, что увеличивается толщина перегретого слоя на нагревателе. Кроме того, растет и показатель степени, что связано с уменьшением интенсивности конденсации в верхней части пузыря.

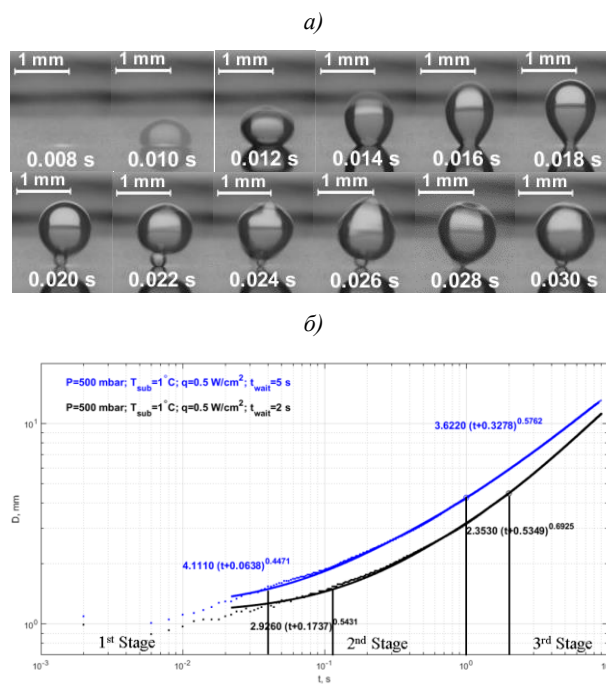


Рисунок 1. (а) Процесс нуклеации пузыря при  $P=500$  мбар;  $T_{sub}=1^\circ\text{C}$ ;  $q=0,5$  Вт/см<sup>2</sup>;  $t_{wait}=2$  с. (б) Влияние времени ожидания на динамику роста пузыря при  $P=500$  мбар;  $T_{sub}=1^\circ\text{C}$ ;  $q=0,5$  Вт/см<sup>2</sup>.

### Список литературы:

- ESR AO-2004-111: BOILING, AO-1999-110: EVAPORATION, AO-2004-096: CONDENSATION
- Sielaff, A., Mangini, D., Kabov, O., Raza, M. Q., Garivalis, A. I., Zupančič, M., ... & Tadrist, L. (2022). The multiscale boiling investigation on-board the International Space Station: An overview. Applied thermal engineering, 117932.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10357, <https://rscf.ru/project/21-79-10357/>

УДК 536.24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ В ПЛОСКОМ МИКРОКАНАЛЕ

Роншин Ф.В., Дементьев Ю.А., Чиннов Е.А.

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

В последние два десятилетия, фактически происходит революционное развитие теплообменных систем с мини-, микро- и наноразмерами, и эти системы оказываются гораздо более энергоэффективными, чем макросистемы с размерами каналов 3–100 мм [1]. Величина отводимых тепловых потоков в создающихся мини- и микротеплообменниках может достигать 1000 Вт/см<sup>2</sup> и более. Наиболее перспективным решением охлаждения представляется использование микроканалов, которые подводятся внутрь чипа, непосредственно к тепловыделяющему элементу. При этом поперечные размеры микроканала связаны с размерами чипа. В связи с этим для широкого круга технических приложений важное значение имеет определение режимов кипения в мини- и микроканалах, которые обеспечивают наиболее эффективные процессы тепло- и массопердачи. В микроканалах смачиваемость и шероховатость поверхности начинают оказывать существенное влияние на формирование режимов двухфазных течений. Хотя к настоящему времени исследования двухфазных течений в круглых трубах выполнены для весьма малых диаметров до 20 мкм, горизонтальные щелевые каналы высотой около 100 мкм остаются не изученными. Однако, в литературе отсутствуют систематические данные по исследованию процесса кипения щелевых микроканалов.

В работе проведено исследование кипения в щелевых микроканалах с характерным размером (высотой) от 50 до 100 мкм. Ширина микроканала выбрана из соображений размера вычислительного чипа – 10 мм. Оптически прозрачный нагревательный элемент (тонкопленочный ПТО нагреватель) размером 100 мм<sup>2</sup> напылен на сапфировое окно, прозрачное в инфракрасном диапазоне, для визуализации поля температур на нагревателе ИК методом. В качестве жидкости использована диэлектрическая жидкость FC-72 с температурой кипения 56°C, что позволяет поддерживать оптимальную для вычислительных микропроцессоров температуру на нагревателе. Для визуализации использовалась модификация шлирен-метода [2]. Использование данной методики позволит достаточно точно фиксировать структуру двухфазного потока в каналах и четко определить границы между режимами. Для визуализации быстротекущих процессов использована скоростная камера Phantom 7.0. Для измерения поля температур на поверхности нагревателя экспериментальный стенд оснащен высокоскоростной термографической камерой Titanium HD 570M “FLIR Systems ATS”. Проведена серия экспериментов по исследованию кипения и гидродинамики двухфазных течений в широких (шириной 10 мм) микроканалах высотой 50-100 мкм. Исследованы режимы кипения в широком диапазоне расходов жидкости (0.5-10 мл/мин) и широком диапазоне тепловых потоков (0-50 Вт). Конвективный режим теплообмена ис-

пользовался для валидации экспериментальных данных и численного моделирования. При увеличении теплового потока начинали формироваться пузыри, начинался процесс кипения.

На рисунке представлена зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока на нагревателе. При небольших тепловых потоках пузыри формировались возле стенок микроканала. С увеличением теплового потока пузыри начинают формироваться и в центре нагревателя. Когда размер пузырей становится достаточно большим, происходит коалесценция, режим кипения становится вспененным. При дальнейшем увеличении теплового потока, газосодержание увеличивается, происходит переход к кольцевому режиму. Область небольших коэффициентов теплоотдачи соответствует конвективному режиму нагрева. С теплового потока, начинается процесс кипения, интенсивность теплообмена возрастает. При максимальном тепловом потоке наблюдалось испарение тонкой пленки жидкости в кольцевом режиме течения, интенсивность теплообмена также возрастала. При дальнейшем увеличении тепловой нагрузки, наблюдалось практически полное испарение рабочей жидкости, режимы были близки к предкризисным, в этом случае эксперименты останавливались для того, чтобы избежать сгорание нагревателя.

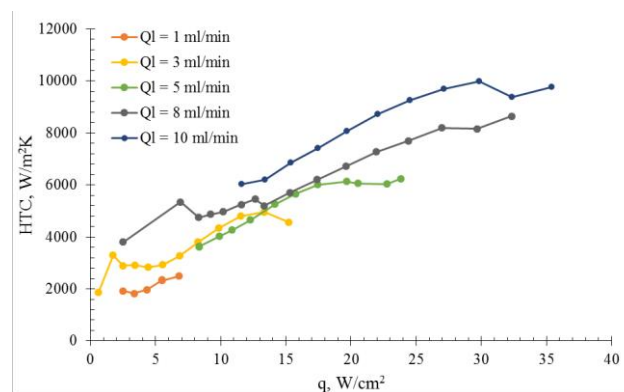


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока в зависимости от расхода.

### Список литературы

1. Jaeseon L., Mudawar I. Low-temperature two-phase microchannel cooling for high-heat-flux thermal management of defense electronics // Components Packaging Technol. IEEE Trans. 2009. V. 32. № 2. P. 453.
2. Ronshin F., Chinnov E. Experimental characterization of two-phase flow patterns in a slit microchannel. //Experimental Thermal and Fluid Science. 2019. V. 103. P. 262-273.

Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 21-79-10357,  
<https://rscf.ru/project/21-79-10357>.

УДК 621.9

**РЕОЛОГИЯ ФЛЮИДОВ. ПРИЧИНЫ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ И СЛЕДСТВИЯ****Рудяк В.Я.**

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)  
630008, Россия, Новосибирск, Ленинградская, 113  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1  
Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, Пирогова, 1

Реология жидкостей является одной из главных их характеристик, поскольку именно она в значительной степени определяет не только способность жидкости течь, но и характер этих течений. Говоря о реологии, нужно провести некоторую границу, хотя и достаточно условную. Классическая гидродинамика описывает эволюцию слабо неравновесных течений, у которых потоки пропорциональны градиентам соответствующих макроскопических переменных. В частности, сдвиговые напряжения пропорциональны скорости сдвига и в этом случае соответствующие жидкости называются ньютоновскими. Сильно неравновесные состояния флюидов, когда градиенты столь велики, что при вычислении потоков необходимо учитывать нелинейные комбинации градиентов также хорошо известны. По понятным соображениям такие течения являются определенной экзотикой.

Однако уже достаточно давно выяснилось, что и при сравнительно небольших скоростях сдвига многие жидкости ведут себя нестандартно: их тензор напряжений нелинейно зависит от скорости сдвига. Такие жидкости называются неньютоновскими. Типичными неньютоновскими жидкостями являются различные смолы, многие полимерные жидкости, дисперсные жидкости и т.д. Если пытаться описать такую жидкость в парадигме ньютоновской, то следует ввести коэффициент вязкости, зависящий от скорости сдвига. Реология большого числа неньютоновских жидкостей экспериментально систематически изучена и предложен ряд моделей, которые эту реологию описывают (Бингама, степенной жидкости, Хершеля–Балкди, Робертсона и т.д.).

Указанные выше модели фактически являются экспериментальными корреляциями. Они лишь фиксируют наблюдаемое, не отвечая на вопрос, почему реология оказалась неньютоновской или почему она трансформируется с изменением скорости сдвига течения. Помимо этого, появляется ряд сопутствующих, но принципиальных вопросов. Назовем два из них. Диффузия в неньютоновской жидкости развивается по тем же законам, что и в ньютоновской или нет? Теплопроводность неньютоновских жидкостей также характеризуется уравнением Фурье или коэффициент теплопроводности является функцией скорости сдвига? Последний вопрос нередко возникает в приложениях, но обычно предполагается выполнение закона Фурье. Это и понятно, поскольку измерить коэффициент теплопроводности при разных скоростях сдвига технически чрезвычайно трудно, хотя и возможно.

Целью данной работы является, с одной стороны, попытка выявить физические причины появления во

флюидах неньютоновской реологии, а с другой, провести анализ конкретных свойств переноса с изменением скорости сдвига.

Внешним маркером изменения реологии является наличие скорости сдвига. Формально, начиная с некоторых скоростей сдвига, тензор напряжений в жидкости перестает быть линейной функцией градиента скорости. Но это означает, что импульс в системе перераспределяется с изменением скорости сдвига иначе. Почему это происходит? Поверхностный ответ почти очевиден: реология меняется из-за изменения структуры жидкости. Не ясно, однако, каковы изменения этой структуры, из-за чего они происходят, как они проявляются и как их экспериментально фиксировать.

Чтобы разобраться в изменении структуры флюида сдвиговые напряжения изучаются с помощью неравновесной молекулярной динамики. Это делается как для обычных жидкостей, так и для наножидкостей. И показано, что переход от ньютоновской к неньютоновской реологии действительно сопровождается изменением структуры жидкости. В наножидкости изучено влияние на трансформацию реологии концентрации, размера наночастиц и их материала. Существенно иная ситуация реализуется в наножидкостях с УНТ. Здесь принципиальным фактором изменения реологии является формирование перколяционной решетки УНТ. Установлена критическая концентрация УНТ перколяции, показано, как она зависит от длины и диаметра УНТ.

В ряде практически важных задач наряду с наличием скорости сдвига имеет место и градиент плотности. В этом случае необходима информация о характере диффузии в неньютоновской жидкости. Показано, что в общем случае в плоском течении Куэтта диффузия неоднородна и описывается существенно различными законами вдоль и поперек потока. Затем показано, как трансформируется закон диффузии Эйнштейна для броуновской частицы в степенной жидкости. Коэффициент диффузии в этом случае зависит от индекса жидкости.

В последней части работы анализируется вопрос о теплопроводности неньютоновских жидкостях. Это сделано для наножидкостей с наночастицами и УНТ. Здесь изучена зависимость напряжений и теплопроводности от концентрации частиц, получены соответствующие корреляции и устанавливается связь коэффициента теплопроводности со скоростью сдвига.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 20-01-00041, мегагрантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021- 575) и грантом РНФ № 20-19-00043.*

УДК 532.135

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ПО ДИНАМИКЕ РАСТЯЖЕНИЯ ЖИДКОГО МОСТИКА

Рябов М.Н., Гобызов О.А., Бильский А.В.

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

В последние десятилетия способ определения реологических свойств неньютоновских жидкостей по характеру растяжения жидкого мостика (в англоязычной литературе - capillary breakup rheometry) приобрел значительную популярность, что объясняется возможностью определения ряда различных параметров, а также применимостью метода за пределами диапазона работы стандартных реометров. В этом методе мостик формируется между двумя каплями исследуемой жидкости, и регистрируется процесс его растяжения и разрыва. В основе метода лежит утверждение, что перетекание жидкости из перетяжки в капли определяется балансом капиллярных сил, способствующих перетеканию, и инерционных и вязких сил, препятствующих ему. В вязкоупругой жидкости релаксация напряжений приводит к постепенному согласованию сил, определяющему скорость утончения нити [1]. С привлечением различных моделей метод позволяет качественно оценивать тип жидкости и определять значения кинематической вязкости, кажущейся продольной вязкости, время разрыва, времена релаксации [2].

В настоящей работе представлен опыт определения времен упругой релаксации слабо вязкоупругих жидкостей на основе высокоскоростной визуализации растяжения жидкого мостика. Для исследований использовалась установка, состоящая из моторизованного транслятора и двух стержней с плоским торцом, один из которых устанавливался стационарно, а второй перемещался по вертикали на трансляторе. Капля жидкости помещалась между стержнями, и со скоростью 1 мкм/с растягивалась до разрыва. Истончение и разрыв мостика регистрировались с на скоростную камеру Photron NOVA S12 с установленным на неё микроскопом с большим рабочим расстоянием (рис. 1). Регистрация выполнялась при частоте съемки 50 кГц и разрешении 3 мкм/пикс.

Были проведены эксперименты с полидиметилсилоксаном (PDMS) Sylgard 184 (чистый и с добавками отвердителя), силиконовыми маслами разной вязкости, чистым полиэтиленгликоля диакрилатом (ПЭГ-ДА) с номинальной  $M_v=700$ , и растворами ПЭГ-ДА /дистиллированная вода с добавками полиакриловой кислоты (ПАК). Для анализа данных скоростной съемки использовалась автоматическая процедура, включающая в себя выделение границ мостика, интерполяцию положения левой и правой границ и определение минимальной ширины мостика. На основе автоматического анализа были получены профили эволюции минимальной ширины мостика во времени. Далее визуально выделялся временной диапазон реализации упруго-капиллярного (elasto-capillary) режима растяжения, и, на основе модели Олдройда-В, выполнялась оценка характерных времён релаксации.

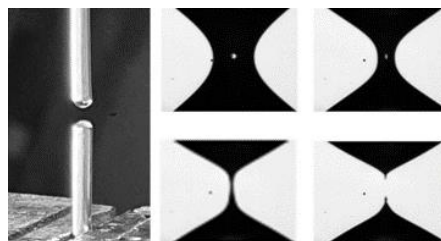


Рис. 1. Фото стержней с каплей после разрыва мостика и стадии разрыва мостика.

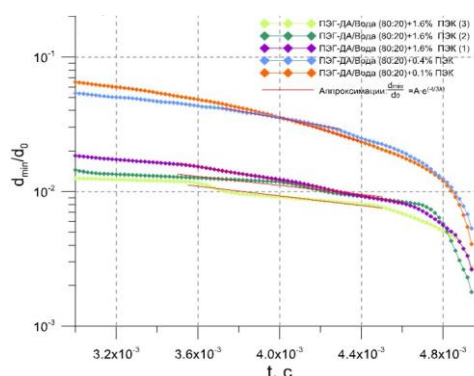


Рис. 2. Эволюция минимальной толщины перетяжки во времени для смеси ПЭГ-ДА с водой (80:20) и ПАК.

Отмечено, что для чистого Sylgard 184, как и силиконовых масел, режим упругого растяжения не регистрировался. Для PDMS Sylgard 184 с отвердителем регистрировалось слабое вязкоупругое поведение, отличие от чистого Sylgard 184 заключалось в характерных временах истончения и разрыва перетяжки, определяемых вязкостью жидкости. Для ПЭГ-ДА с добавлением ПАК (безводный раствор) также наблюдался вязкий ньютоновский режим истончения, при этом концентрация ПАК влияет на вязкость раствора. Смесь ПЭГ-ДА с водой (80:20) и добавкой ПАК в массовой концентрации 0,4% и 1,6% демонстрирует выраженные вязкоупругие свойства, а при более низкой концентрации ПАК (0,1%) – слабовязкоупругие свойства. Получены следующие характерные времена релаксации: ПЭГ-ДА/вода+0,1%ПАК – 2,7 мс; ПЭГ-ДА/вода +0,4%ПАК – 6,2 мс; ПЭГ-ДА/вода+1,6%ПАК – 30 мс; Sylgard 184/отвердитель (3:2) –17 мс.

### Список литературы:

1. A.V. Bazilevsky, V.M. Entov, A.N. Rozhkov, Liquid filament microrheometer and some of its applications. in: Third European Rheology Conference and Golden Jubilee Meeting of the British Society of Rheology, Springer, 1990, pp. 41–43.
2. Rodd L.E., Scott T.P., Cooper-White J., Mckinley G.H. Capillary Break-up Rheometry of Low-Viscosity Elastic Fluids// Applied Rheology T.15 №1, С. 12-27

Работа выполнена в рамках проекта  
РНФ № 21-19-00732.



УДК 532.526

**УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ СОБСТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ  
СКОЛЬЗЯЩЕГО КРЫЛА С ПОМОЩЬЮ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОТСОСА  
ЧЕРЕЗ МЕЛКОПЕРФОРИРОВАННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ**

**Садовский И.А., Катасонов М.М., Козлов В.В.**

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

Ламинарно-турбулентный переход в трехмерном пограничном слое на скользящем крыле может быть инициирован различными видами неустойчивости. Среди них рост собственных возмущений – волн Толлмина – Шлихтинга. Данные возмущения имеют тенденцию к нарастанию в области положительного (неблагоприятного) градиента давления вдали от передней кромки. В данной работе исследуется влияние распределенного отсоса в области неблагоприятного градиента давления на развитие естественных и акустически усиленных возмущений в трехмерном пограничном слое.

В качестве модели был использован участок скользящего крыла с хордой  $c=807$  мм и размахом  $z=950$  мм. Зона отсоса представляла собой вкладыш прямоугольного сечения размером  $80 \times 200$  мм, смонтированный параллельно передней кромке крыла на расстоянии  $0,5c$  от неё. Эта зона, расположенная на  $100$  мм дальше координаты максимальной толщины профиля, соответствует началу области неблагоприятного градиента давления. Поверхность вставки находится вровень с поверхностью крыла и представляет собой гидродинамически – гладкую проницаемую поверхность, изготовленную с использованием технологий 2-го поколения. Проницаемость поверхности составляет  $17\%$  и достигается за счет пор круглого сечения диаметром  $0,17$  мм расположенных в шахматном порядке. Коэффициент отсоса в данном случае был равен  $C_{\mu}=0,019$ . Скорость отсасываемого газа у поверхности в отсутствие основного потока была измерена экспериментально и оказалась равна  $U_s=1,8$  м/с. Неравномерность этой величины вдоль поверхности вставки не превышала  $0,05$  м/с.

Эксперимент проводился в рабочей части малотурбулентной аэродинамической трубы Т-324 ИТПМ СО РАН. Скорость набегающего потока составляла  $U_{\infty}=10,5$  м/с. Изучалось воздействие отсоса на соб-

ственные возмущения пограничного слоя, развивающиеся в естественных условиях и усиливаемые с помощью акустического воздействия на гармонической частоте естественных возмущений. Генерация и усиление возмущений в пограничном слое на скользящем крыле является апробированным методом, применявшимся, например, в работах [1, 2].

Результаты исследований показали, при заданных параметрах течения на расстоянии порядка  $300$  мм от передней кромки вдоль хорды крыла формируется отрывной пузырь, что способствует очень быстрому нарастанию возмущений в пограничном слое. Естественные возмущения в данных условиях активно нарастают и проходят все стадии эволюции вплоть до турбулентного пятна в конце области измерений. Распределенный отсос меняет характер течения, устраняя отрыв. Под воздействием отсоса картина эволюции возмущений меняется и наблюдается их затухание. Уровень интегральных пульсаций в точке на  $100$  мм дальше задней кромки зоны отсоса отличается в  $10$  раз. Звуковое воздействие не влияет на среднее течение, но усиливает скорость роста возмущений. В той же точке уровень пульсаций возмущения с наложенным акустическим воздействием в  $2,5$  раза больше чем и без него. Распределенный отсос так же воздействует на усиленные акустикой собственные возмущения, уменьшая уровень пульсаций в  $24$  раза.

Список литературы:

1. 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.
2. Суржиков С.Т. Перенос излучением в неоднородном слое// ТВТ. 1997. Т. 35. № 3. С. 1–2.

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 годы (проект АААА-А17- 121030500149-8).*

УДК 621.039.5

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА ЕВКЛИД/V2 ОТДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ТЕРМИЧЕСКОМУ РАЗРУШЕНИЮ ТВЭЛОВ И ТВС

Сайкина Т.А., Чухно В.И., Усов Э.В., Прибатурин Н.А.

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, 115191, Россия, г. Москва, Большая Тульская ул., д. 52

Разработка новых типов реакторных установок требует обоснования их безопасности. В частности, необходимо понимать, какие процессы протекают при тяжёлой аварии, чтобы минимизировать ее последствия. Однако проведение экспериментов на тестовых реакторах, имитирующих аварийные ситуации, обладает серьёзными недостатками. Основными из них являются: дороговизна, плохая масштабируемость результатов, а также невозможность по понятным причинам имитировать тяжёлую аварию. Следовательно, протекание некоторых аварий рационально моделировать с использованием расчётных кодов, основанных на методах математического моделирования.

Для анализа и обоснования безопасности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах разрабатывается интегральный расчётный код ЕВКЛИД/V2 [1]. Данный расчётный код включает в себя несколько модулей для моделирования разных процессов, протекающих как при штатной работе реактора, так и при аварийной ситуации. Для моделирования разрушения твэлов и активной зоны при тяжёлой аварии разрабатывается модуль SAFR. Процессы, протекающие в теплоносителе, рассчитываются в теплогидравлическом модуле HYDRA-IBRAE/LM.

Для моделирования термического разрушения твэлов на оксидном топливе в SAFR решаются две задачи: тепловая задача и задача стекания. Тепловая задача решается с помощью уравнения теплопроводности. Задача стекания решается с помощью системы из трёх уравнений, которые представляют собой законы сохранения: массы, энергии и импульса. Обе задачи решаются методом конечных объёмов.

Представленная работа посвящена моделированию двух экспериментов, один из них проведён на тестовом стенде в ИТ СО РАН, другой проведён на экспериментальном реакторе SCARABEE [2].

Тестовый участок стенда, использованный в ИТ СО РАН, содержал имитатор твэла, нагревательный стержень, пирометр. Оксидное урановое топливо имитировалось оксидом алюминия  $Al_2O_3$ , так как оксиды близки по свойствам. В ходе представленной работы была создана нодализационная схема имитатора твэла и проведены численные расчёты с помощью модуля SAFR. В результате было определено влияние неопределённости исходных данных на результаты расчётов и сформулированы требования к проведению дальнейших экспериментов.

Экспериментальный быстрый реактор SCARABEE включал в себя одну ТВС, состоящую из 37 твэлов. Проводился эксперимент по моделированию аварии с полной мгновенной блокировкой проходного сечения. Измерялась температура теплоносителя внутри

сборки и температура оболочек твэлов. В ходе данной работы была создана нодализационная схема, проведено моделирование с помощью модулей SAFR и HYDRA-IBRAE/LM, выполнен анализ протекающих процессов.

В результате работы была выполнена валидация кода и подтверждена его способность моделировать процессы, происходящие при термическом разрушении твэлов и ТВС. Валидация производилась по температуре, в диапазоне от 500 К до 1800 К. Относительная погрешность валидации на базе экспериментов, проведённых в ИТ СО РАН, не превышает 27%. Для экспериментов, проведённых на SCARABEE, эта величина не превышает 7% для оболочек твэлов и 22% для теплоносителя. Полученные данные будут использованы для оценки неопределённости расчётов при моделировании тяжёлых аварий на быстром реакторе с термическим разрушением твэлов и ТВС.

Пример сопоставления экспериментальных данных и результатов расчётов представлен на рис. 1.



Рис. 1. График зависимости температуры оболочки ТВЭЛов 1 радиального слоя от времени в эксперименте, выполненном на реакторе SCARABEE.

## Список литературы:

1. А. А. Бутов, В. С. Жданов, И. А. Климонов, И. Г. Кудашов, А. Э. Кушлиметов, Н. А. Мосунова, А. А. Сорокин, В. Ф. Стрижов, Фролов С.А., Э. В. Усов, В. И. Чухно Физические модели для расчета разрушений твэла и активной зоны реактора с жидкометаллическим теплоносителем, реализованные в коде ЕВКЛИД/V2 // Теплоэнергетика. 2019. № 5. с.5–15.
2. Kayser G., Charpenel J., Jamond C. Summary of the SCARABEE-N Subassembly Melting and Propagation Tests with an Application to a Hypothetical Total Instantaneous Blockage in a Reactor// Nuclear Science and Engineering. №128:2, С. 144–185.

УДК 533.9:629.78

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГРАФИЧЕСКИХ ЯДЕР ДЛЯ РАСЧЁТА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОБЪЁМНОГО ЗАРЯДА ВБЛИЗИ ЦЕПОЧЕК ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

Сальников М.В., Сухинин Г.И.

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

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 итеративной формуле

$$Z_k^{t+1} = Z_k^t + h_z \left( F_{q,k} + F_{an,k} + F_{ext,k} + F_e \right), \quad (1)$$

где  $F_{q,k}$  – сила кулоновского взаимодействия  $F_n$  – сила, действующая на пылевые частицы согласно пространственному распределению ионов,  $F_{ext,k}$  – внешняя сила, действующая на пылевые частицы,  $F_e$  – сила со стороны внешнего поля.

Однако даже такого приближения оказывается зачастую недостаточным для расчёта самосогласованного пространственного распределения объёмного заряда и равновесных позиций пылевых частиц в адекватный период времени. В рамках данной работы была проведена имплементация в расчётную модель архитектуры графических ядер CUDA [4], которая позволила значительно ускорить вычисление относительно использованной ранее технологии MPI.

В данном подходе за расчёт траектории отдельно взятого иона отвечало отдельное графическое ядро, что позволило увеличить число одновременно наблюдаемых ионов до  $10^6$ – $10^7$ .

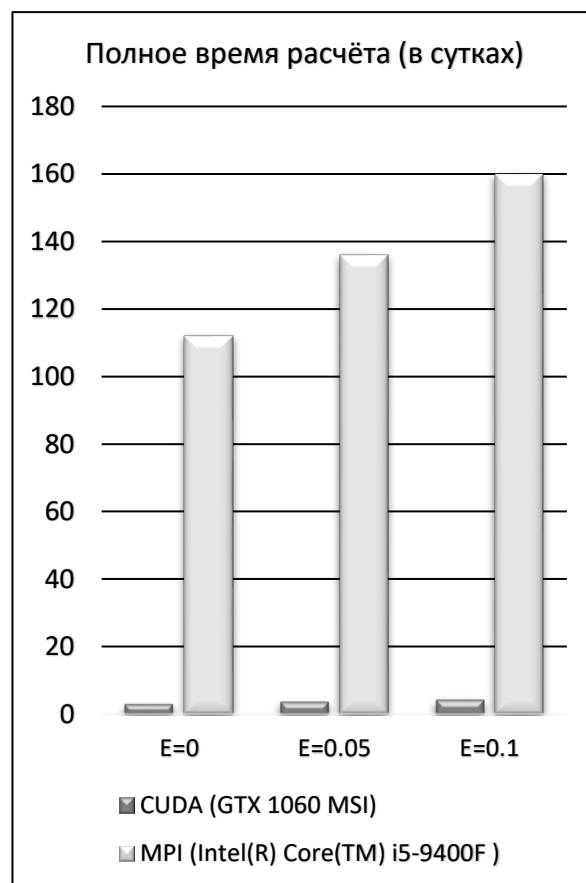


Рис.1. Сравнение суммарного времени затраченного на расчёт для технологий CUDA MPI для трёх различных безразмерных полей.

### 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.
4. NVIDIA, Vingelmann, P., & Fitzek, F. H. P. CUDA, release: 10.2.89 2020, Retrieved from <https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>.

УДК 536.24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ОТ ГАЗОВОГО ФАКЕЛА МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

Сапожников С.З.<sup>1</sup>, Митяков А.В.<sup>1</sup>, Андреев Ю.В.<sup>2</sup>, Проскурин В.М.<sup>1</sup>, Павлов А.В.<sup>1</sup>, Бобылев П.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29

<sup>2</sup> Комитет по топливно-энергетическому комплексу Ленинградской области yuv\_andreev@lenreg.ru

### Введение.

Настройка горелочного аппарата котельных агрегатов требует сочетания параметров горения, удовлетворяющих экологическим нормам, с уровнем тепловыделений от факела. Ключевым фактором здесь является оценка тепловыделений от факела и их распределение по топке котла.

### Опытный стенд.

Эксперименты проводились на газовой горелке OILON (GP – 6.10), при температуре окружающего воздуха 15°C. Горелка устанавливалась на стенде (см. рис. 1), который предоставляет доступ к любой области факела.

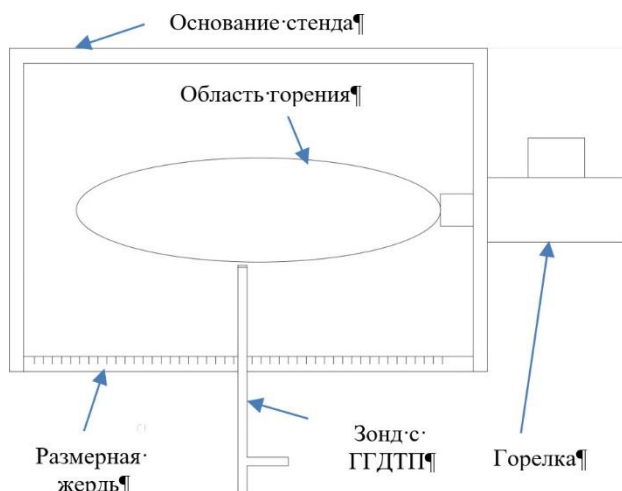


Рис. 1. Схема опытного стенда.

Плотность теплового потока (ПТП) измерялась методом градиентной теплотметрии. Он основан на использовании гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГДТП), реализующих поперечный эффект Зеебека [1]. Зонд с датчиком теплового потока на торце трубы, позволяет измерять местную плотность теплового потока по сечению факела и на его периферии.

### Результаты эксперимента.

Расход газа на горение составил  $2,2 \cdot 10^{-3}$  кг/с. Режим горения подбирался таким образом, чтобы получить стабильный бесцветный факел. Такой режим наиболее энергоэффективен [2].

Измерения местной плотности теплового потока (см. рис. 2) демонстрируют три области горения: об-

ласть холодного пламени ( $0 \geq x \geq 100$ ), область активного горения ( $100 \geq x \geq 325$ ) и хвостовую область ( $325 \geq x \geq 600$ ), что соответствует физической картине струйного факела [3].

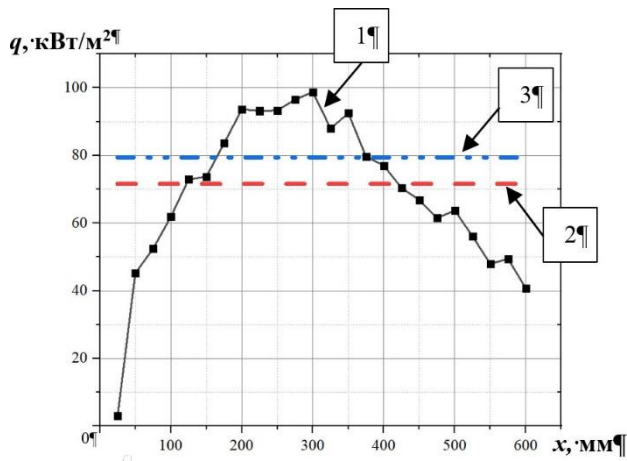


Рис. 2. Изменение плотности теплового потока на периферии пламени по его длине: 1 – локальная ПТП; 2 – среднее значение ПТП; 3 – расчетное значение ПТП.

Средняя плотность теплового потока, полученная в эксперименте, составила 71,6 кВт/м<sup>2</sup>. Теоретические значения плотности теплового потока, полученные по уравнению теплового баланса, составили 79,4 кВт/м<sup>2</sup>. Рассчитана реакция горения пропана, без учета присосов воздуха при устойчивом режиме горения. Отклонение экспериментальных значений от расчетных составило 9,8%.

### Вывод.

Применение градиентной теплотметрии в совокупности с газовым анализом позволит настраивать горелочные аппараты на оптимальные режимы работы и повысить эффективность использования органических топлив.

### Список литературы:

1. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu. / Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement // St.-Petersburg: Springer International Publishing, 2020, p 209.
2. Ковалев А. П. и др. Парогенераторы: Учебник для вузов / А. П. Ковалев, Н. С. Лелеев, Т. В. Виленский; Под общ. Ред. А. П. Ковалева // М: Энергоатомиздат. 1985. С. 376.
3. Снегирев А. Ю. Испарение жидкости и диффузионное горение конденсированных топлив: учеб. пособие / А. Ю. Снегирев, В. А. Талалов, В. В. Степанов // СПб: Изд-во Политехн. ун-та. 2017. С 218.

УДК 536.24

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ ВОДЫ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

Сапожников С.З., Павлов А.В., Бобылев П.Г.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29

### Введение

В аварийных ситуациях, когда необходимо охладить перегретую поверхность, важно разрушение паровой пленки и возникновение развитого пузырькового кипения, при котором резко вырастает плотность теплового потока.

В работе измерена плотность теплового потока и температура поверхности шаровой модели при кипении в насыщенной и недогретой воде.

### Постановка эксперимента

Экспериментальная модель представляет собой титановый шар диаметром 34 мм [1] с установленным на нем гетерогенным градиентным датчиком теплового потока [2] и термопарой. Это позволяет соотнести значения плотности теплового потока (ПТП) с температурой поверхности и определить температуру, при которой происходит разрушение паровой пленки.

### Результаты эксперимента

При погружении нагретого шара (300 °С) в насыщенную воду (см. рис. 1) получены критические значения плотности теплового потока, соответствующие значениям в точке Лейденфроста (0,47 МВт/м<sup>2</sup>) при критическом температурном напоре в 170°С.

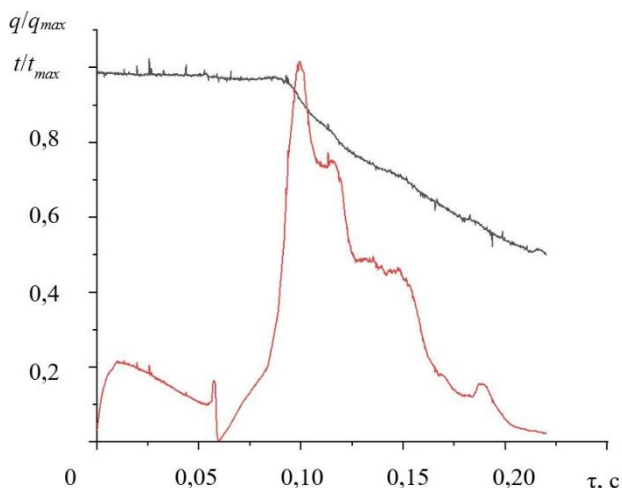


Рис. 1. Зависимость безразмерных температуры и плотности теплового потока от времени.

Максимум плотности теплового потока соответствует переходу к пленочному режиму кипения и началу интенсивного охлаждения.

В экспериментах с недогретой жидкостью, для фиксации устойчивого пленочного режима кипения

потребовалось увеличить начальную температуру шара до 464 °С. Критическая плотность теплового потока при увеличении недогрева монотонно возрастает (см. рис. 2).

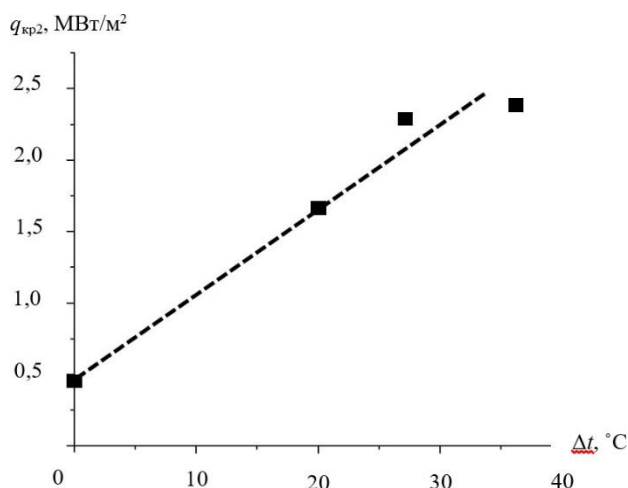


Рис. 2. Зависимость критической плотности теплового потока от недогрева жидкости ( $\Delta t = t_s - t_f$ ).

В опытах удалось достаточно точно определить температуру, при которой разрушается паровая пленка. Это позволило рассчитать критические значения коэффициента теплоотдачи (КТО) (см. табл. 1.).

Таблица 1. ПТП и КТО при различных недогревах воды.

$\Delta t, \text{ }^\circ\text{C}$	$q_{kp2}, \text{ МВт/м}^2$	$\alpha_{kp2}, \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$
0	0,47	2,6
20	1,66	4,5
27	2,3	6,2
36	2,4	5,6

Предложенный метод позволяет измерить плотность теплового потока и рассчитать коэффициент теплоотдачи при кипении в большом объеме насыщенной и недогретой жидкости.

### Список литературы:

1. Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В., Гусаков А. А., Павлов А. В., Бобылев П. Г. Исследование кипения на поверхности шара методом градиентной теплометрии. // Тепло-вые процессы в технике. 2021. Т. 13. №10. С 434-441.
2. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Yu. / Heatmetry. The Science and Practice of Heat Flux Measurement // St.-Petersburg: Springer International Publishing, 2020, p 209.

Исследование выполнено при поддержке  
гранта РФФ 22-29-00160.

УДК 536.631, 669.721'891

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ СПЛАВОВ МАГНИЯ С КАЛЬЦИЕМ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР

Самошкин Д.А., Абдуллаев Р.Н., Агажанов А.Ш., Станкус С.В.

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

В настоящее время исследование сплавов на основе магния и кальция остается актуальной задачей, поскольку вызывает растущий интерес их применения в качестве конструкционных материалов благодаря уникальным преимуществам, таким как низкая плотность и удельная прочность, и поэтому они широко используются в транспортных средствах для достижения облегченной конструкции. Кроме того, сплавы Mg-Ca обладают надлежащими механическими и биосовместимыми свойствами (низкая скорость деградации по сравнению с другими биоматериалами на основе Mg, способность к регенерации кости за счет высвобождаемого компонента Ca) и поэтому имеют большой потенциал в качестве несущих разлагаемых биоматериалов, например, искусственных костей человека. Надежные и систематизированные данные по теплофизическим свойствам (в том числе по теплоемкости) сплавов необходимы для конструирования на их основе новых материалов и их успешное внедрение в разных областях промышленности. Однако обзор имеющейся в литературе информации показал, что экспериментальному исследованию теплоемкости сплавов Mg-Ca уделяется недостаточно внимания. Исходя из этого, целью данной работы являлось экспериментальное исследование удельной теплоемкости интерметаллического сплава  $Mg_2Ca$ , а также сплавов Mg-Ca с содержанием кальция 10,5 и 73,0 ат.% в широком интервале температур твердого состояния.

Удельная теплоемкость  $c_p$  исследовалась методом ДСК на экспериментальной установке DSC 404 F1. Измерения осуществлялись в низкотемпературном (190–375 К) и высокотемпературном (320–576...692 К) интервалах со скоростями нагрева 2 К/мин и 10 К/мин, соответственно, в проточной атмосфере аргона (20 мл/мин) чистотой 99,992 об.%. В качестве калибровочных образцов использовались сапфир и нержавеющая сталь марки 12X18Н10Т для низкотемпературного и высокотемпературного интервала, соответственно. Оцениваемая погрешность полученных данных по  $c_p$ , подтвержденная измерениями эталонных материалов, составила 2–4%.

Экспериментальные данные по  $c_p$  эвтектического сплава Mg-Ca (10,5 ат.% Ca), а также сравнение рекомендуемых значений теплоемкости исследованных сплавов Mg-Ca, вместе с данными для чистых Mg и Ca, полученных авторами настоящей работы ранее, представлены на рис. 1, 2. Как видно из рис. 1, результаты по  $c_p$  сплава  $Mg_{89.5}Ca_{10.5}$ , полученные в последовательных термических циклах нагрева-охлаждения, хорошо воспроизводятся между собой. Также можно заметить, что никаких структурных переходов в данном сплаве в исследованном интервале температур твердого состояния обнаружено не было. Похожее по-

ведение  $c_p$  наблюдалось для остальных исследованных сплавов Mg-Ca. Из рис. 2 видно, что увеличение содержания Ca в сплавах Mg-Ca приводит к понижению их удельной теплоемкости.

По результатам проведенных измерений были разработаны таблицы и рекомендуемые температурные зависимости удельной теплоемкости сплавов Mg-Ca с содержанием кальция 10,50, 73,00 и 33,34 ат.%, которые можно использовать для различных научных и практических приложений.

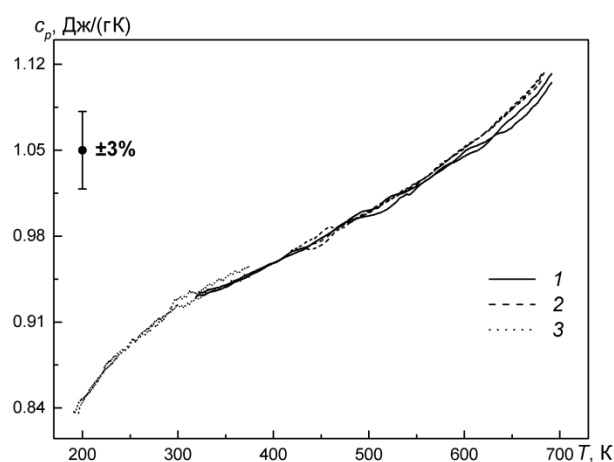


Рис. 1. Экспериментальные данные по удельной теплоемкости эвтектического сплава  $Mg_{89.5}Ca_{10.5}$ : 1 – нагревы, соответствующие высокотемпературному интервалу измерения; 2 – охлаждения, соответствующие высокотемпературному интервалу измерения; 3 – нагревы, соответствующие низкотемпературному интервалу измерения.

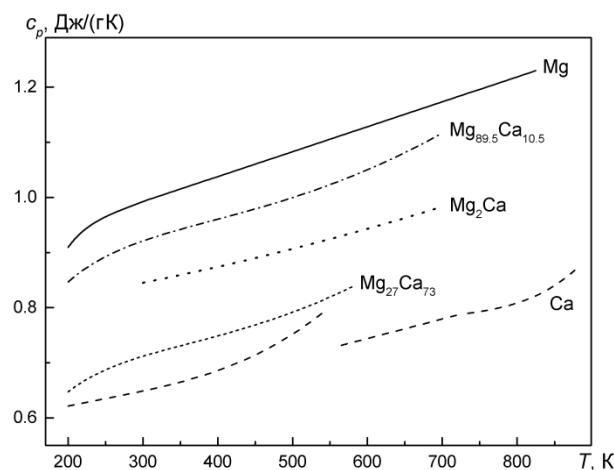


Рис. 2. Температурные зависимости удельной теплоемкости сплавов Mg-Ca и чистых Mg и Ca.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10025).

УДК 533.9

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Сахапов С.З., Пинаев В.А.

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

Распыление графитовых и композитных электродов в дуговом разряде эффективно используется для синтеза углеродных наноструктур [1, 2] и наночастиц в углеродной матрице [3, 4]. Основные преимущества дугового распыления: химическая чистота синтезированных материалов в разряде в атмосфере инертного газа; возможность модификации материалов в химически активной атмосфере; контроль размеров наноструктур путем выбора параметров разряда; простота процесса. Продукты напыления композитных электродов в электрической дуге представляют собой наночастицы, окруженные углеродом, что предотвращает коагуляцию наночастиц без остановки доступа газа или жидкости к частице, что позволяет использовать такие композиты в качестве высокоэффективных катализаторов. После кальцинации синтезируемой сажи углерод удаляется с частичным или полным окислением, при этом могут возникать наночастицы с полый структурой [3, 4].

Экспериментальная установка (рис. 1) представляла собой цилиндрическую вакуумную камеру, которую предварительно откачивали, а затем заполняли рабочим газом.

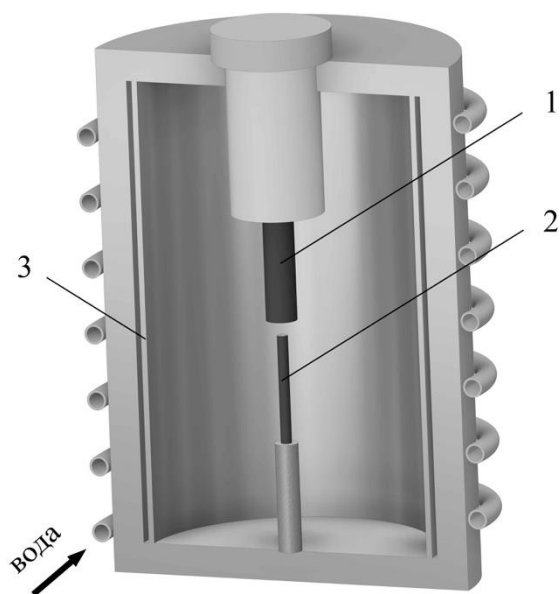


Рис. 1. Экспериментальная установка.

1 – подвижный графитовый катод; 2 – композитный анод; 3 – охлаждаемый съемный экран.

Дуговой разряд зажигался между двумя графитовыми электродами, которые находились на оси симметрии камеры. Отрицательное напряжение прикладывалось через силъноточный металлокерамический герметичный вход к подвижному графитовому электроду (1), который представлял собой цилиндр диаметром 3 см. Заземленный стационарный композитный электрод (2) был прикреплен к корпусу камеры. Сменный композитный анод представляет собой графитовый стержень диаметром 0,8 см и длиной 8 см. Дуговой разряд зажигался и поддерживался источником постоянного тока, что позволяло проводить эксперименты при токе от 80 до 200 А. При распылении анода силъфонный блок передачи позволял перемещать катод для поддержания постоянного напряжения на разрядном промежутке.

Температура дугового разряда определялась методом оптической эмиссионной спектроскопии плазмы. Регистрация излучения разряда осуществлялась через кварцевое окно в разрядной камере с помощью спектрометра Avantes AvaSpec 2048 FT, имеющего дифракционную решётку 1200 шт/мм и разрешение 0,18 нм в спектральном диапазоне 350–600 нм и дифракционную решётку 600 шт/мм и разрешение 0.4 нм в спектральном диапазоне 600–1000 нм. Измерение температуры газа дугового разряда осуществлялось по спектру излучения вращательной структуры полосы (0-0) перехода  $d^3P_g \rightarrow a^3P_u$  молекулы  $C_2$ . Для этого были рассчитаны длины волн и соответствующие интенсивности излучения линий трех подветвей P, R и Q ветвей. Константы для расчёта тонкой структуры взяты из работы [5]. Расчитанный линейчатый спектр излучения сворачивался с предварительно найденной аппаратной функцией используемого в работе спектрального прибора. Измеренный спектр излучения (0-0) полосы Свана аппроксимировался методом наименьших квадратов. Варьируя величину вращательной температуры, достигали лучшей аппроксимации и таким образом определяли температуру состояния  $d^3P_g$ , считая что она близка к температуре газа дугового разряда. Точность измерения абсолютного значения температуры газа составляла не более 10%. Более подробное описание используемого в работе метода определения температуры газа можно найти в работе [6].

### Список литературы:

1. W. Kratschmer, L.D. Lamb, K. Fostiropoulos, D.R. Hoffman // Nature. 1990. Vol. 3347. P. 354–358.
2. J.H.J. Scott, S.A. Majetich // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 52. P. 12564–12571.
3. D.V. Smovzh, S.Z. Sakhapov, A.V. Zaikovskii, S.A. Novopashin // Ceram. Int. 2015. Vol. 41. P. 8814–8819.
4. D.V. Smovzh, S.Z. Sakhapov, A.V. Zaikovskii, S.A. Chernova, S.A. Novopashin // Ceram. Int. 2019. Vol. 45. P. 7338–7343.
5. B. Bai, H.H. Sawin, B.A. Cruden // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 013308:1–11.
6. V.A. Pinaev, M.V. Isupov // Journal of Physics: Conference Series, 2019. V. 1382(1), 012164.

*Работа выполнена при поддержке  
Российского научного фонда, проект  
№ 18-19-00213.*

УДК 533

## ЛОКАЛЬНАЯ ЛАМИНАРИЗАЦИЯ В УСКОРЕННОМ ТЕЧЕНИИ С СУЩЕСТВЕННО ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ГАЗА ВБЛИЗИ СТЕНКИ

Сахнов А.Ю.

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

В работе [1] на основе достаточно простого анализа интегрального соотношения импульсов для ускоренного турбулентного пограничного слоя В.М. Кейс получил минимальное значение параметра  $K=3.55 \times 10^{-6}$ , при котором происходит реламинаризация всего турбулентного пограничного слоя. Как показано в работе [2] турбулентные пульсации и кинетическая энергия турбулентности снижаются в условиях ускоренного течения, что и является индикатором ламинаризации.

В ускоренных пристенных течениях с существенной разницей плотности газа вблизи стенки и в основном потоке может возникать явление прострела продольной скорости, при котором скорость внутри пограничного слоя превышает скорость основного потока [3]. Чтобы исследовать это явление в турбулентном пограничном слое на нагретой стенке, мы задавали слабое ускорение потока  $K=3 \times 10^{-7}$ . Однако, кинетическая энергия турбулентности вблизи стенки была снижена по сравнению с ускоренным турбулентным потоком, а распределение скорости совпадало с ламинарным профилем [4]. Таким образом, ламинаризация происходила локально, только в пристенной области пограничного слоя.

В данной работе проведено численное моделирование пограничного слоя воздуха на нагретой поверхности при наличии продольного градиента давления (Рис.1). Численная модель состояла из системы уравнений Прандтля, описывающих динамические и тепловые процессы в пограничном слое, и  $k-\omega-\gamma$  модели турбулентности, позволяющей обоснованно моделировать ламинарно-турбулентный переход и подавление турбулентности. Для решения дифференциальных уравнений применялись конечно-разностные методы. Расчётная сетка имела сгущение к стенке по всей её длине и к передней кромке пластины до  $Re_x=100$ , а при больших числах Рейнольдса шаг сетки вдоль оси  $x$  оставался постоянным  $2 \times 10^{-5}$  м.

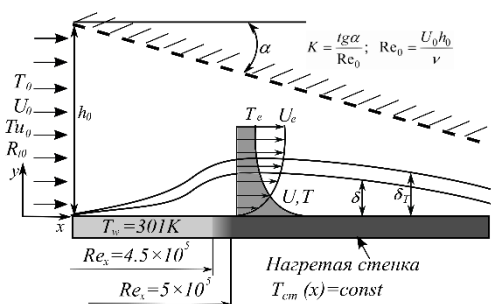


Рис. 1. Схема течения.

На рис. 2 показано сравнение профилей продольной скорости в пограничном слое на нагретой стенке в присутствии слабого градиента давления. Профиль 1 соответствует течению рассчитанному с учётом модели турбулентности  $T_{cm}=1110$  К. Исходя из

данных по коэффициенту перемежаемости и кинетической энергии турбулентности, этот профиль вблизи стенки описывает распределение скорости ламинарного течения, а в остальной части пограничного слоя изменение скорости соответствует турбулентному потоку. Профиль 2 рассчитан без модели турбулентности в тех же условиях, что и профиль 1. Как видно, профили 1 и 2 вблизи стенки совпадают, отличаясь только величиной прострела. Профиль 3 рассчитан с учётом модели турбулентности при  $T_{cm}=1100$  К. Здесь локальная ламинаризация вблизи стенки отсутствует. Очевидно, что без изменения режима течения разница по температуре стенки в 10 К незначительна для распределения скорости в пограничном слое. Однако, появление локальной ламинаризации вблизи стенки приводит к заметному различию профилей 1 и 3 в этой области. Таким образом, профиль 1 состоит из ламинарной и турбулентной частей. Другими словами, локальная ламинаризация приводит к одновременному сосуществованию ламинарного и турбулентного течений внутри пограничного слоя.

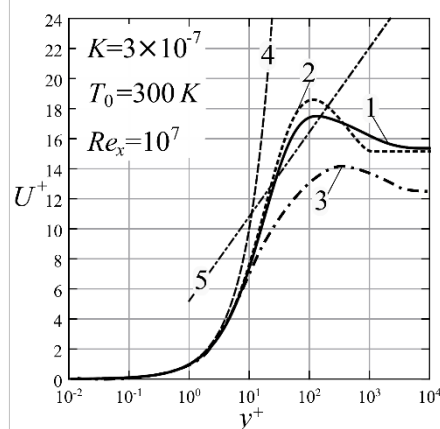


Рис. 2. Профили скорости при  $T_{cm}=1110$  К:  
1 – расчёт с моделью турбулентности, 2 – расчёт без модели турбулентности; 3 – профиль скорости при  $T_{cm}=1100$  К; 4 – ламинарный подслей; 5 – логарифмический закон.

### Список литературы:

1. W.M. Kays, Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York, 1966.
2. G. Saltar, G. Araya Reynolds shear stress modeling in turbulent boundary layers subject to very strong favorable pressure gradient // Computers and Fluids 2020. V 202. Paper 104494.
3. Бояршинов Б.Ф., Волчков Э.П., Лукашов В.В. Теплообмен в ускоренном химически реагирующем пограничном слое // ДАН. 1996. Т. 350. № 6. С. 763–765.
4. A.Yu. Sakhnov 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.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН №121031800217-8.



УДК 532.517.4, 532.574.7

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТАРШИХ МОМЕНТОВ СКОРОСТИ И ЕЕ ПРОИЗВОДНОЙ В КРУГЛОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ

Северин А.С.<sup>1,2</sup>, Илюшин Б.Б.<sup>1</sup>, Первунин К.С.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

<sup>3</sup> Department of Chemical Engineering, Imperial College London, SW7 2AZ, United Kingdom, London

Течение затопленной свободной струи является фундаментальной задачей физической гидродинамики, поскольку часто встречается в различных промышленных приложениях, а также в природной среде. Кроме того, оно обладает достаточно простой структурой, позволяющей проверять теоретические модели со ссылкой на подробные экспериментальные данные. Особый интерес представляют такие струи в виде двухфазного потока. Например, пузырьковые колонны широко используются в химических, биохимических и нефтехимических реакторах. На практике жидкость часто насыщается пузырьками газа для интенсификации массопереноса между фазами через большую поверхность раздела и увеличения скорости смешивания. Двухфазные среды также преобладают в абсорбционных аппаратах, испарителях, скрубберах, воздушных подъемных насосах и многих других устройствах.

На сегодняшний день в литературе имеется значительный объем различных экспериментальных данных по диагностике струйных течений, в том числе и результаты PIV измерений [1, 2]. Получены распределения средних и турбулентных характеристик потока. Однако, несмотря на большое количество экспериментальных данных по сдвиговым течениям, информация о распределении статистических моментов высокого порядка отсутствует из-за практической сложности вычисления ввиду значительной чувствительности статистических моментов высокого порядка к ошибочным измерениям, вне зависимости от объема исходной выборки.

В данной работе исследуется турбулентная структура однофазной затопленной свободной струи при помощи анализа мгновенных полей скорости, полученных методом PIV. Сначала исходные поля подвергались процедуре статистической фильтрации [3]. Необходимость такой фильтрации обусловлена значительным вкладом в итоговую сумму статистического момента векторов скорости, соответствующая проекция которых существенно отличается от среднего значения. Затем по отфильтрованным полям рассчитывались статистические моменты, в том числе коэффициенты асимметрии (Рис. 1) и эксцесса.

Кроме того, строилось поле асимметрии продольной пространственной производной продольной составляющей скорости:

$$S_{\partial} = \frac{\langle (\partial_L v)^3 \rangle}{\langle (\partial_L v)^2 \rangle^{3/2}}$$

Знак данной характеристики совпадает со знаком продольной структурной функции третьего порядка, являющейся важной величиной в теории турбулентности и характеризующей каскадный перенос энергии по спектру [4]. Отрицательное значение структурной

функции третьего порядка говорит о переносе энергии от крупномасштабных вихревых структур к мелкомасштабным (прямой каскад энергии), в то время как положительное – от мелких к крупным (обратный каскад).

В результате проведенных расчетов были построены распределения статистических моментов высокого порядка и продольной структурной функции третьего порядка. Анализ знака структурной функции позволил установить зоны обратного каскада энергии (Рис. 2).

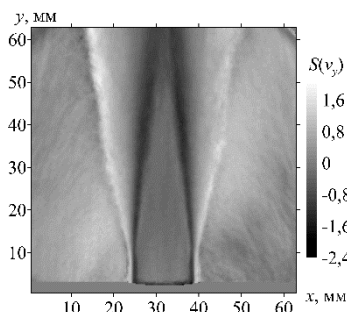


Рис. 1. Распределение коэффициента асимметрии продольной составляющей скорости.

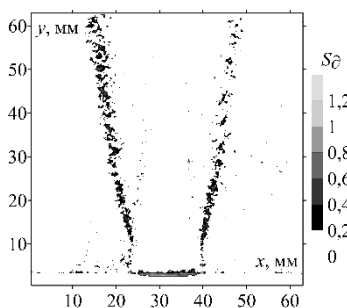


Рис. 2. Распределение коэффициента асимметрии продольной производной продольной скорости.

### Список литературы:

1. Alekseenko S.V., Dulin V.M., Markovich D.M., Pervunin K.S. Experimental investigation of turbulence modification in bubbly axisymmetric jets // Journal of Engineering Thermophysics. 2015. Vol. 24. Iss. 2. P. 101-112.
2. Pervunin K.S., Timoshevskiy M.V. Bubbly free and impinging jets: experimental study by means of PIV and PFBI // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. 2016. Vol. 754. Iss. 3. Art. 032016. (7 p.).
3. Heinz O.M., Ilyushin B.B., Markovich D.M. Application of a PDF method for the statistical processing of experimental data // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2004. Vol. 25. Iss. 5. P. 864-874.
4. Hrebtev M.Yu., Ilyushin B.B., Krasinsky D.V. Inverse energy cascade in a turbulent round jet // Physical Review E. 2010. Vol. 81. Iss. 1. Art. 016315. (6 p.).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-79-30075.

УДК 536.24

## ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ НА НАГРЕВАЕМЫХ ПОДЛОЖКАХ, ПОКРЫТЫХ ОДНОСТЕННЫМИ И МНОГОСТЕННЫМИ КАРБОНОВЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Семенов А.А., Зайцев Д.В., Кабов О.А.

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

Испарение капель, помещенных на нагретую твердую поверхность, повсеместно применяется в промышленных процессах, таких как охлаждение с помощью спреев, струйные системы и технологии нанесения покрытий, производство новых электронных и оптических устройств и медицинские тесты. Также изучение испаряющихся капель жидкости важно для понимания механизмов, происходящих в сложных системах. Наибольший интерес вызывает тот факт, что испарение капель жидкости существенно интенсифицирует теплообмен и влияет на течение внутри капли.

Во многих экспериментах изучалось испарение достаточно крупных капель при относительно небольшой разнице температур между нагретой подложкой и окружающей средой [1–4]. В нашей работе исследуется процесс испарения капель жидкости, имеющих начальный объем менее 2 мкл, при разности температур между твердой подложкой и атмосферой до 70 К. Основная цель – сравнить влияние покрытия подложки с различной ориентацией углеродных нанотрубок на динамику испарения капель жидкости в квазистационарных условиях при ее нагреве со стороны подложки. Предполагается, что в силу различных факторов (изменение смачиваемости, повышение теплопроводности поверхностного слоя подложки, структура поверхности на микро- и наноуровне) использование покрытия из нанотрубок может интенсифицировать процесс испарения.

Были исследованы три подложки из меди марки М1. Первая подложка без покрытия была отполирована до среднеквадратичной шероховатости около 20 нм. Для полировки медной подложки использовали алмазный порошок с зернистостью от 0,1 до 1 мкм. Две другие подложки имели покрытия с разной ориентацией углеродных нанотрубок. Одна имела покрытие из многостенных углеродных нанотрубок с вертикальной ориентацией. Синтез массивов нанотрубок осуществлялся в реакторе электронно-лучевого химического осаждения из паровой фазы. Толщина полученного «леса» углеродных нанотрубок составляет около 10 мкм. На поверхность другой подложки напыляли горизонтально ориентированные одностенные углеродные нанотрубки (среднеквадратичная шероховатость 62 нм). Толщина покрытия оценивается порядка 1 мкм. Морфологию рабочих поверхностей анализировали до и после экспериментов с помощью сканирующего электронного микроскопа HITACHI S3400N и атомно-силового микроскопа Solver Pro NT MDT.

Исследования испарения покоящихся капель жидкости проводились с использованием системы анализа формы капель DSA100 производства KRUSS. В результате обработки данных были получены зависимости различных параметров сидячей капли жидкости

(краевого угла, объема, диаметра основания и др.) в процессе испарения от времени.

Как известно из [5], что для сидячей капли жидкости в режиме испарения с постоянным диаметром потеря массы в единицу времени пропорциональна диаметру капли и не зависит от объема капли и контактного угла. Этот факт позволяет количественно сравнивать данные для капель с разными начальными параметрами (рис.1).

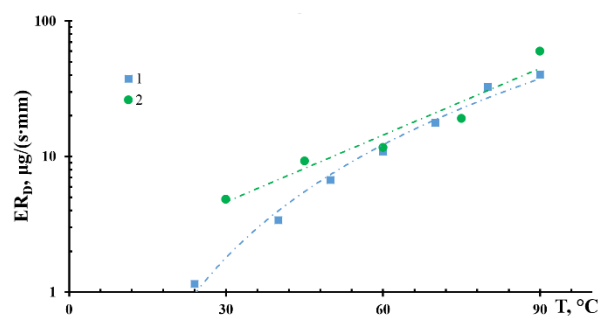


Рис. 1. Потеря массы капель в единицу времени, деленная на диаметр капель, в зависимости от температуры подложки: Квадратные маркеры (1) – полированная медная поверхность без покрытия. Круглые маркеры (2) – поверхность с покрытием из вертикально ориентированных многостенных углеродных нанотрубок. Для каждой экспериментальной точки данные усредняются по всему времени испарения капли. Пунктиром обозначены линии тренда.

Количественный анализ данных показал, что скорость испарения на подложке с вертикально ориентированным покрытием из многостенных нанотрубок до двух раз выше, чем на подложке без покрытия (Рис.1). Заметной разницы в динамике испарения капли между горизонтально ориентированным покрытием из углеродных нанотрубок и полированной медной подложкой в исследованном диапазоне температур подложки не обнаружено.

### Список литературы:

- Gatapova, E. Y., Semenov, A. A., Zaitsev, D. V., Kabov, O. A., Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 441, pp. 776–785, 2014.
- Kabov, O. A., Gatapova, E. Y., Semenov, A. A., Jutley, M. S., Ajaev, V. S., Kirichenko, E. O., Zaitsev, D. V., Experimental and numerical studies of evaporation of a sessile water drop on a heated conductive substrate. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, vol. 6, no. 4, 2018.
- Kuznetsov, G. V., Feoktistov, D. V., Orlova, E. G., Batishcheva, K. A., Regimes of water droplet evaporation on copper substrates. *Colloid Journal*, vol. 78, no. 3, pp. 335–339, 2016.
- Semenov, A. A., Feoktistov, D. V., Zaitsev, D. V., Kuznetsov, G. V., Kabov, O. A., Experimental investigation of liquid drop evaporation on a heated solid surface. *Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 22, no.6, pp. 771–774, 2015.
- Sobac, B., Brutin, D., Triple-line behavior and wettability controlled by nanocoated substrates: influence on sessile drop evaporation. *Langmuir*, vol. 27, no. 24, pp. 14999–15007, 2011.

УДК 533.6.011.5:532.582.2

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЦИОНАРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ

Семенов А.Н., Косинов А.Д.

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

Задача взаимодействия сверхзвукового пограничного слоя при числе Маха=2 и стационарной слабой ударной волны, рассмотренная в данной работе, в основном связана с задачей возникновения турбулентности. В данный момент, предсказание ламинарно-турбулентного перехода наиболее сложная задача, которая напрямую связана с восприимчивостью к внешним возмущениям.

В ранних работах [1] показано, что сценарий ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое сильно зависит от уровня внешних возмущений в свободном потоке. В сверхзвуковых аэродинамических трубах присутствуют акустические возмущения, порожденные стенками сопла и рабочей части. В более ранней нашей работе [2] были проведены параметрические исследования взаимодействия свободно ориентированной в пространстве акустической волны и сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине. Амплитуды возмущений в пограничном слое, порожденных акустическими волнами, могут нарастать на порядок и приводить к раннему ламинарно-турбулентному переходу. Акустические пульсации от неровностей на стенках и сопле аэродинамической трубы могут порождать квазистационарные возмущения в виде слабых ударных волн. Ранее [3] были обнаружены высокие уровни пульсации массового расхода в пограничном слое при взаимодействии со слабой ударной волной. В работе [4] представлены результаты экспериментального исследования возбуждения интенсивных возмущений внешней слабой ударной волной в ламинарном пограничном слое на модели плоской пластины с острой и затупленной передней кромкой при  $M = 2,5$ . Установлено, что поле возмущений от двумерного выступа в турбулентном пограничном слое на стенке рабочей части аэродинамической трубы в свободном потоке имеет вид N-волны. Также было показано, что интенсивность порождаемых пульсаций в пограничном слое внешними слабыми ударными волнами в несколько раз выше, чем в пограничном слое на модели с острой передней кромкой. Численное моделирование взаимодействия волны и сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине с острой передней кромкой при числах Маха=2.5 с использованием оригинального пакета программ проводилось в работе [5].

Данная работа является сопроводительными расчетами к эксперименту, проводимому в сверхзвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН. Выбирались параметры потока соответствующие проводимым экспериментам: число Маха=2, единичное число Рейнольдса  $Re_1=6 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$ , температура торможения потока 290°K. Стационарные

слабые ударные волны порождались от неоднородности на поверхности боковой стенки в рабочей части. Неоднородность представляет из себя плоской выступ на расстоянии 230 мм вверх по потоку от модели размерами 7мм шириной и 120 мкм высотой (см. рис. 1). Для решения задачи использовался программный комплекс программ ANSYS Fluent с помощью которого проводится прямое численное моделирование на основе уравнений Навье-Стокса. Рассматривается идеальный газ с удельной теплоемкостью  $\gamma=1.4$  и числом Прандтля  $Pr=0.72$ . Вязкость изменяется по закону Са-зерленда при значении  $T_s=110^\circ\text{K}$ .

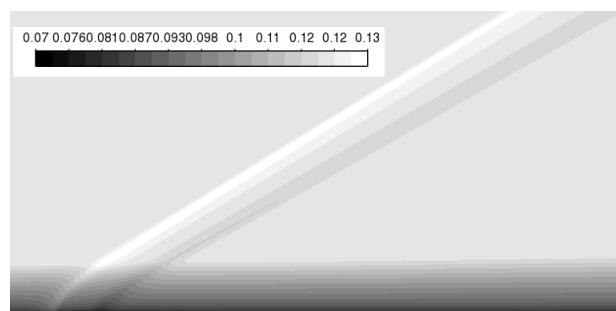


Рис. 1 Контуры распределения плотности от неоднородности толщиной 120 мкм.

В результатах будет показано, что неровность на стенке приводит к появлению пары слабых ударных волн, называемых N-волной. Будут представлены результаты порождения пульсация в пограничном слое для острой и затупленной передней кромки плоской пластины, а также сравнение с экспериментом.

### Список литературы:

1. Развитие возмущений в сжимаемых потоках / С.А. Гапонов, А.А. Маслов. – Новосибирск: Наука, 1980. 144 с.
2. Гапонов С.А., Семенов А.Н. Численное моделирование взаимодействия сверхзвукового пограничного слоя с акустической волной // Известия РАН. Механика жидкости и газа. - 2018. -№.6. – С. 76–86.
3. Ваганов А.В., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В., Шалаев В.И. Экспериментальное исследование структуры течения и перехода в пограничном слое треугольного крыла с затупленными передними кромками при числах Маха 2, 2.5 и 4 // Труды МФТИ. 2013. Т. 5. № 3, с. 164–173.
4. Ваганов А.В., Ермолаев Ю.Г., Колосов Г.Л., Косинов А.Д., Панина А.В., Семенов Н.В., Яцких А.А. К воздействию падающей волны Маха на сверхзвуковой пограничный слой // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 1, с. 45–50.
5. Егоров В.И., Динь К.Х., Нгуен Н.К., Пальчиковская Н.В. Численное моделирование взаимодействия волны маха и сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине с острой передней кромкой // Ученые записки ЦАГИ. Т. LII. № 3, с. 18–28.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00666.

УДК 621.9

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПЕРЕНОСА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Семенов Д.С., Ненарокомов А.В.

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),  
Москва, 125080, Волоколамское шоссе, 4

Прогнозирование и оптимизация процесса теплопереноса предполагает математическое моделирование. В случаях, когда значения параметров являются неизвестными величинами, возникает необходимость их определения.

Традиционные методы исследования нестационарных процессов радиационно-кондуктивного теплопереноса предполагают размещение температурных датчиков на некоторой глубине в образце исследуемого материала и регистрацию отклика на внешнее тепловое воздействие [1]. Однако, если такой подход невозможен, необходима разработка новых методов оптимизации теплового воздействия и оптимального планирования эксперимента. Одним из примеров такого процесса является лазерная гипертермия поверхностных тканей, применяемая в лечении онкологических заболеваний, который выбран целевым для конкретизации условий решаемой задачи [2].

Целью данной работы была разработка расчетно-экспериментального метода идентификации математической модели радиационно-кондуктивного теплопереноса с бесконтактными измерениями на основе теории обратных задач математической физики.

### Материалы и методы

Рассматривается одномерная задача: пластина толщиной  $d$ , имитирующая верхний слой кожи, облучается тепловым потоком лазера и выполняются бесконтактные измерения температуры поверхности тепловизионной камерой. Процесс гипертермии предполагает предварительный нагрев и поддержание температуры поверхности в заданном диапазоне порядка 41–45°C, что достигается периодическим включением и выключением лазерного модуля [3]. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

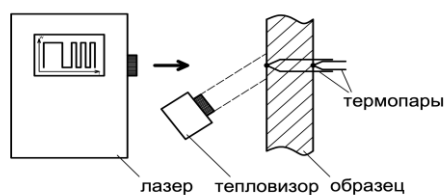


Рис. 1. Схема эксперимента (термопарные измерения использовались для контроля протекания процесса).

В таком случае, процесс гипертермии описывается системой уравнений:

$$C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + A q_l e^{-rx}$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad 0 < x < d$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) = A q_l(\tau) + \alpha(T(0, \tau) - T_e(\tau)), \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{max}$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(d, \tau) = q_2(\tau), \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{max}$$

где  $C$  – теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $T$  – температура;  $d$  – толщина образца;  $\tau$  – время;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $r$  – линейный коэффициент поглощения;  $A$  – поглощающая способность.

Разработанная методика идентификации предполагает итерационную минимизацию функционала невязки расчетных и экспериментальных температур [4]. Причем, на этапе охлаждения определяются коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  и теплопроводности  $\lambda$ , а на этапе периодического нагрева лазером – коэффициент поглощения  $r$  и поглощающая способность  $A$ .

### Результаты

С целью апробации методики была изготовлена экспериментальная установка и разработан программный комплекс для реализации расчетов.

Результаты эксперимента (рис. 2) были использованы в качестве входных данных.

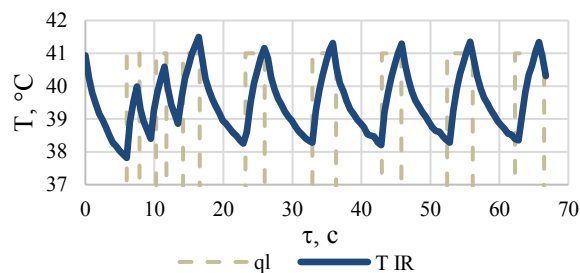


Рис. 2. Результаты эксперимента: показания тепловизионной камеры  $T_{IR}$  (режим работы лазера  $q_l$  приведен справочно).

Менее чем за 20 итераций был восстановлен комплекс неизвестных характеристик исследуемого материала: значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , теплопроводности  $\lambda$ , поглощающей способности материала образца  $A$  и линейного коэффициента поглощения  $r$ .

### Список литературы:

- Музылев Н.В. О единственности одновременного определения коэффициентов теплопроводности и объемной теплоемкости // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1983. Т. 1, № 83. С. 102–108.
- Rossmann C., Haemmerich D. Review of temperature dependence of thermal properties, dielectric properties, and perfusion of biological tissues at hyperthermic and ablation temperatures. Crit Rev Biomed Eng. 2014. Vol. 42, № 6. P. 467–492.
- Домбровский Л.А., Тимченко В.М. Лазерная гипертермия поверхностных опухолей: модели переноса излучения, сложного теплообмена и деградации биологических тканей // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7, № 1. С. 24–36.
- Ненарокомов А.В., Семенов Д.С. Исследование радиационно-кондуктивного теплопереноса путем бесконтактных измерений. Идентификация математических моделей для непрозрачных материалов // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94, № 6. С. 1458–1464.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90317.

УДК 536.248.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПРЕЙНОГО ОРОШЕНИЯ ПРОЗРАЧНОЙ ИМПАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Сердюков В.С.<sup>1,2</sup>, Миськив Н.Б.<sup>1,2</sup>, Владыко И.В.<sup>1,2</sup>, Суртаев А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

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

Спрейное орошение является одним из наиболее эффективных и востребованных режимов охлаждения и термостабилизации теплонапряженных устройств. Среди главных преимуществ данного типа охлаждения можно отметить возможность отводить высокие тепловые потоки при одновременном обеспечении достаточно равномерной температуры поверхности, способность охлаждать объекты сложной (не плоской) формы и относительно большие площади поверхности даже при использовании единичной форсунки, низкие расходы жидкости [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Применение и оптимизация систем струйного и спрейного охлаждения сегодня широко обсуждаются применительно к разработке систем охлаждения таких устройств, как высокопроизводительные чипы и лазеры, системы хранения водорода, светодиоды и т.д.

Однако наличие большого набора параметров, влияющих на данный процесс, и отсутствие достоверной информации об интегральных и локальных нестационарных характеристиках теплообмена приводит к сложности определения основных механизмов отвода тепла от перегретой поверхности и теоретического описания процесса. Более того, для определения взаимосвязи между гидродинамическими характеристиками двухфазного потока (плотность потока капель, их размер и скорость) и теплообменном для последующего теоретического моделирования требуется проведение комплексных исследований.

В данной работе для одновременного определения пространственного распределения коэффициента теплоотдачи и визуализации картины орошения с возможностью измерения основных характеристик газочапельного потока были использованы высокоскоростные ИК-термография и видеосъемка с обратной стороны прозрачной импактной поверхности.

В качестве источника спрея в работе была использована форсунка BKT SS 4230 со сплошным конусом распыления. В качестве рабочей жидкости была использована очищенная, деионизированная вода. В качестве рабочего газа был использован воздух. В работе была использована импактная поверхность из сапфира с напыленным тонкопленочными нагревателями из оксида индия-олова. Исследование интенсивности теплообмена и эволюции температурного поля нагревателя проводилось с помощью высокоскоростной термографии [2, 3].

Прозрачная конструкция нагревателя на основе сапфировой подложки (рис. 1) позволила изучить интегральные характеристики орошения, например, определить площадь смоченных областей, оценить характерное число капель жидкости, попадающих на

импактную поверхность, проанализировать однородность орошения и т.д. Также удалось идентифицировать одиночные капли перед их непосредственным соударением с импактной поверхностью или формирующейся пленкой жидкости. В итоге был проведен подробный статистический анализ распределения капель по размерам. Наконец, использованный формат видеосъемки позволил исследовать эволюцию межфазной поверхности при соударении капель с формирующейся на поверхности пленкой жидкости. В частности, отчетливо видно формирование как мелкомаштабных возмущений пленки при попадании мелких капель, так и образование крупных кратеров и т.н. «короны» из капель при воздействии крупных капель.

Площадь смоченной поверхности, число капель, однородность орошения

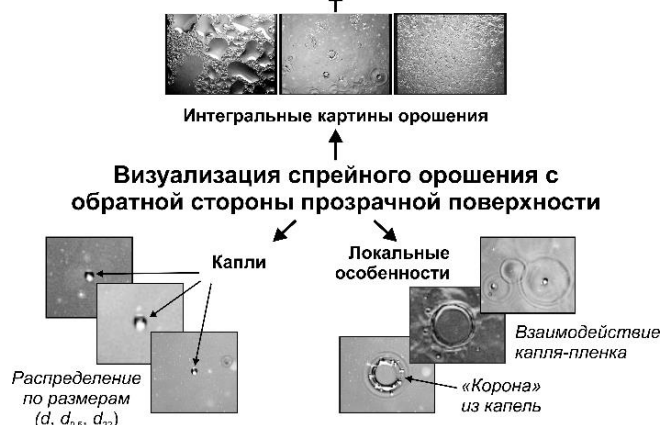


Рис. 1. Преимущества использования прозрачной импактной поверхности для исследования характеристик спрейного орошения.

Также в работе были изучены интенсивность теплообмена и величина критического теплового потока при спрейном орошении прозрачной подложки при варьировании расходов рабочих жидкости и газа. Показано, что увеличение расходов приводит к интенсификации теплоотдачи и повышению КПД.

### Список литературы:

1. G. Liang, I. Mudawar Review of Spray Cooling–Part 1: Single-Phase and Nucleate Boiling Regimes, and Critical Heat Flux // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. V. 115. P. 1174.
2. V. Serdyukov, N. Miskiv, A. Surtaev The simultaneous analysis of droplets' impacts and heat transfer during water spray cooling using a transparent heater // Water. 2021. V. 13. №. 19. P. 2730.
3. А.С. Суртаев, А.Д. Назаров, Н.Б. Миськив, В.С. Сердюков, (2022). Применение высокоскоростной видеосъемки и ИК-термографии для исследования характеристик двухфазного потока и теплообмена при аэрозольном охлаждении нагретой поверхности // Теплофизика высоких температур. 60(1), 142–145.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского Научного Фонда (проект № 22-19-00581)

УДК 536.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В РЯДЕ ЦИЛИНДРОВ

Сероштанов В.В., Маслов В.А., Митяков А.В.

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

Обтекание нагретых цилиндров различных сечений, установленных в различной конфигурации относительно 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 [1], турбулентности набегающего потока, эффекты поджатия [2] 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 натурных экспериментов варьировались скорость набегающего потока  $W$  и расстояние между цилиндрами  $S$  (рис. 1).

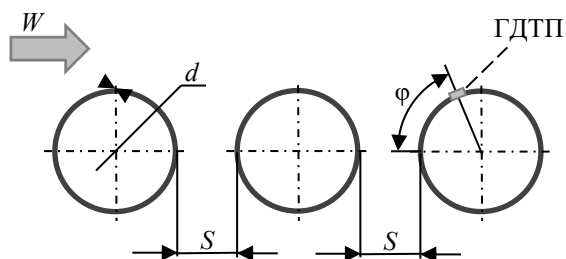


Рис. 1. Схема экспериментальной модели.

Все три полых цилиндра, выполненные из стального листа толщиной 0,1 мм, обогреваются насыщенным водяным паром при атмосферном давлении, обеспечивая таким образом постоянную температуру поверхности. На исследуемом цилиндре (на рис. 1 – третьем) установлен градиентный датчик теплового потока (ГДТП) с размерами  $2 \times 2 \times 0,2$  мм [3]. Исследуемый цилиндр проворачивался вокруг оси на угол  $\varphi$  в пределах от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ , что позволило получить зависимость плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи (КТО) от угла поворота цилиндра.

Для понимания поведения КТО выполнены PIV-исследования модели. Получены мгновенные и осредненные по времени поля скорости вблизи цилиндров, что позволило связать картину течения с поведением параметров теплообмена. В работе использован PIV комплекс компании ПОЛИС [4].

Опыты проводились в дозвуковой аэродинамической трубе в диапазоне чисел Рейнольдса, рассчитанного по диаметру  $d$ , от 400 до  $80 \cdot 10^3$ . Расстояние  $S$  менялось от  $0,5d$  до  $4d$ . Измерены осреднённые по времени и мгновенные значения местных КТО и скорости  $W$ , что позволило изучить пульсационные характеристики в периодически повторяющиеся процессах.

На рис. 2 совмещены распределения местного числа Нуссельта  $Nu_\phi$  по первому, второму и третьему в ряду цилиндру для числа Рейнольдса  $Re = 9600$  и расстояния  $S = d$ .

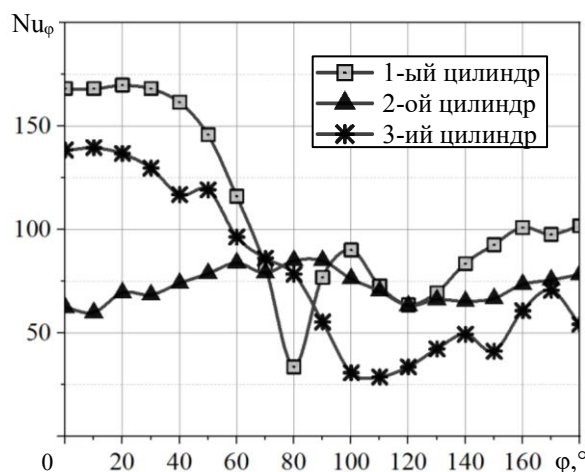


Рис. 2. Зависимость местного КТО от угла  $\varphi$  ( $Re = 9600$ ,  $S = d$ ).

Видны заметные отличия кривых КТО: наличие максимума КТО и его положение зависит как от режима (числа Рейнольдса), так и от параметра  $S$ . Для второго цилиндра явный минимум отсутствует. Местное число Нуссельта на поверхности второго и третьего цилиндра зависит от того, в какой части следа он расположен. Повышение КТО связано с тем, что именно в этой области цилиндр, стоящий ниже по потоку взаимодействует с вихрем, сошедшим с впереди стоящим. Поля скорости, полученные с помощью PIV, показывают, что в этой же области наблюдаются максимальные отклонения скорости.

В работе установлено влияние вихреобразования на характеристики течения и теплообмена цилиндров, установленных один за другим. Наиболее эффективным для теплообмена является расстояние  $S = d$ .

### Список литературы:

1. Jogee S., Prasad B., Anupindi K. Large-eddy simulation of non-isothermal flow over a circular cylinder // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 151. P. 17.
2. 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.
3. Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В. Основы градиентной теплотометрии. — СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 215 с.
4. А. А. Гусаков, М. А. Греков, В. В. Сероштанов. Исследование обтекания и теплообмена на поверхности одиночного кольцевого ребра. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 151–164.

Работа поддержана грантом РФФ  
22-29-00156.

УДК 681.3:536.24.08

**ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЫХ ТРУБ**

**Серяков А.В., Алексеев Анд.П.**

ООО «Рудетранссервис»

173003, Россия, Великий Новгород, ул. Санкт-Петербургская, 64

Представлены результаты исследований методом решения обратной задачи теплопроводности теплоемкости испарителя  $C_{ev}$  работающей короткой тепловой трубы с паровым каналом, выполненным в виде сопла Лавала. При большом температурном напоре и начале кипения рабочей жидкости измеряемая температура внешней поверхности капиллярно-пористого испарителя близка к постоянной, и проводя решение коэффициентной обратной задачи теплопроводности [1] с экспериментальными значениями температуры испарителя, удастся получить численную оценку теплоемкости работающего испарителя ТТ и удельную теплоту испарения кипящего рабочего тела и сравнить ее с табличными значениями.

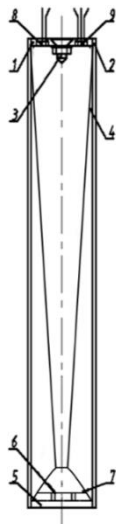


Рис.1. Схема ТТ: 1 – верхняя крышка; 2 – цилиндрический корпус ТТ; 3 – запорный узел; 4 – капиллярно-пористая вставка; 5 – нижняя крышка; 6 – инжекторные каналы; 7 – капиллярно-пористый испаритель; 8,9 – емкостные датчики конденсации, измеряющие толщину пленки жидкого конденсата.

В качестве рабочей жидкости применен эфир диэтиловый  $C_4H_{10}O$  с температурой кипения при атмосферном давлении  $T_B=308.65K$  ( $35.5^\circ C$ ), критические параметры  $T_C=466.55K$  ( $193.4^\circ C$ ),  $P_C=3.61MPa$ .

$$\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{R_{ev}(t)} \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} = C_{ev}(t) \dot{t}(z, \tau); \bar{z} = \frac{z}{L_{TT}} \leq 0.035 \quad (1)$$

где  $R_{ev}(t)$  – тепловое сопротивление испарителя,  $C_{ev}$  – теплоемкость испарителя,  $L_{TT}$  – полная длина ТТ, толщина испарителя =  $0.035 \cdot L_{TT}$ .

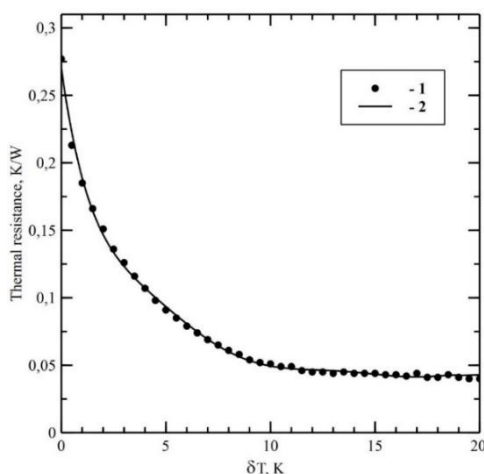


Рис.2. Тепловое сопротивление  $R_{TT}$ , зависящее от перегрева испарителя  $\delta t = T_{ev} - T_B$  относительно температуры кипения диэтилового эфира при атмосферном давлении. 1 – точки, экспериментальные стационарные значения  $R_{TT}$  коротких ТТ; 2 – сплошная линия, экспериментальные значения  $R_{TT}$  той же ТТ, при линейном нагреве со скоростью  $3 \cdot 10^{-3} K/s$ .

Из анализа рис.2 тепловая мощность испарителя  $q_{ev}$  может быть записана в следующем виде [2]:

$$q_{ev}(\bar{z} = 0.035, \tau_k) = -0.035 \frac{L_{TT}^2}{R_{TT} F(\bar{z})} \left. \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} \right|_{\bar{z}=0.035} \quad (2)$$

Решение уравнения (3) для испарителя с кипящим диэтиловым эфиром было проведено итерационным методом с определением функционала расхождения между левой и правой частями уравнения (3) и его минимизации с помощью метода сопряженных градиентов с известной функцией теплового сопротивления  $R_{TT}(t)$ .

Результаты расчетов приведены на рис.3, погрешность восстановления теплоемкости  $C_{evk}(t)$  менее 3.5 %.

$$\int_0^{0.035} z C_{evk}(t) \dot{t}(z, \tau_k) dz = 0.035 q_{ev}(\bar{z}, \tau_k) \quad (3)$$

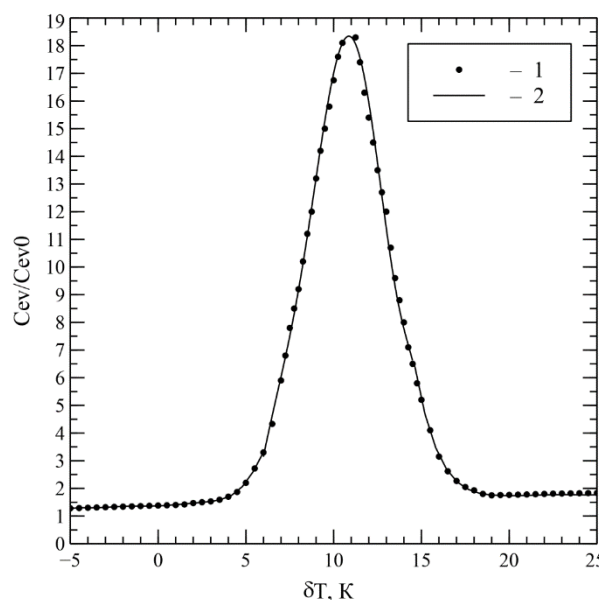


Рис.3. Расчетное значение теплоемкости испарителя ТТ  $C_{ev} / C_{ev0}$ :  $C_{ev}$  – теплоемкость насыщенного диэтиловым эфиром испарителя,  $C_{ev0}$  – теплоемкость испарителя опорной ТТ, заполненного осушенным воздухом. 1 – черные точки, значения относительной теплоемкости фрагмента испарителя ТТ с выполненным в виде сопла Лавала паровым каналом, полученные путем решения обратной задачи теплопроводности с шагом по температуре  $0.5 K \delta t = T_{ev} - T_B$ , при начинающемся процессе кипения диэтилового эфира; 2 – полином десятой степени для сглаживания точек теплоемкости испарителя.

**Список литературы:**

1. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. Л.: 1973. 144с.
2. Seryakov A.V., Alekseev A.P. A Study of the Short Heat Pipes by the Monotonic Heating Method // Journal of Physics: Conference Series. 2020. v. 1683 022051.

УДК 536

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ КИПЕНИЯ И ДИНАМИКИ ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Ситников В.О.<sup>1,2</sup>, Гатапова Е.Я.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский Государственный Университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, e.gatapova@nsu.ru

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

Работа посвящена изучению динамики падающей капли жидкости на нагретую поверхность, а также изучению режимов кипения. В качестве рабочей поверхности служила сапфировая пластина с прозрачным нагревателем из оксида индия-олова (ITO), температура изменялась в диапазоне от 150 до 190°C. В качестве рабочей жидкости использовалась деионизированная вода (Merck Millipore) после дегазации. Капля жидкости объемом  $12.7 \pm 0.3$  мкл и начальной температурой 23°C формировалась с помощью шприцевого насоса и наконечника диаметром 0.35 мм. число Вебера составило  $We=88.5$ . Производилась визуализация с помощью высокоскоростной камеры Photron Nova s12 и стереомикроскопа Альтами. Подробное описание экспериментальной установки можно найти в предыдущих работах [1, 2].

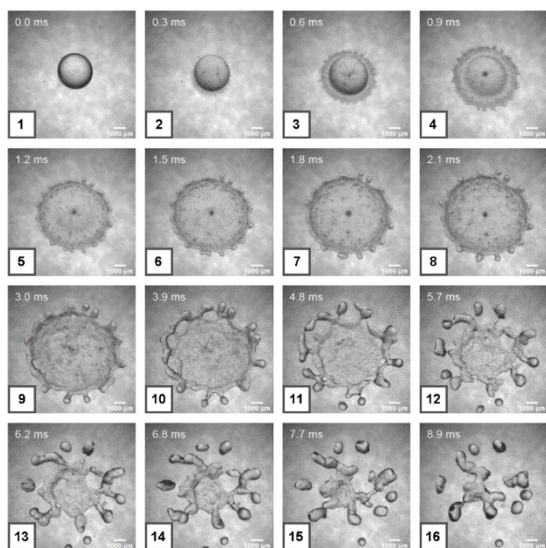


Рис. 1. Процесс удара капли о подложку, нагретую до температуры 180°C.

Были проведены серии экспериментов для каждого температурного режима, обработаны данные (см. рис. 1). Покадровая обработка велась с помощью программы ImageJ. Были получены средние диаметры растекания и средние контактные диаметры капли, изучены режимы кипения, классифицированные в работе [3]. Масштаб составлял примерно 37,35 микрон на пиксель.

В результате исследований показано, что время и скорость растекания капли жидкости практически не зависят от температуры подложки. Показано различие диаметра растекания и диаметра контакта (см. рис. 2 и рис. 3) для высоких температурных режимов. Объяснено резкое понижение контактного диаметра с ро-

стом температуры. Показано уменьшение времени достижения максимальных диаметров с ростом температуры.

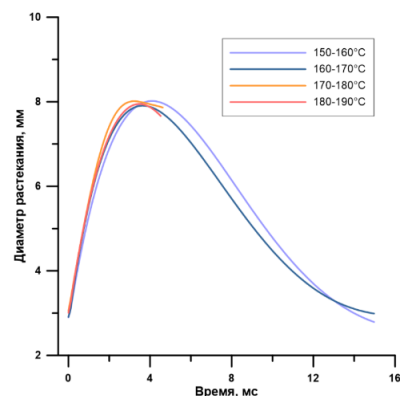


Рис. 2. График зависимости диаметра растекания от времени.

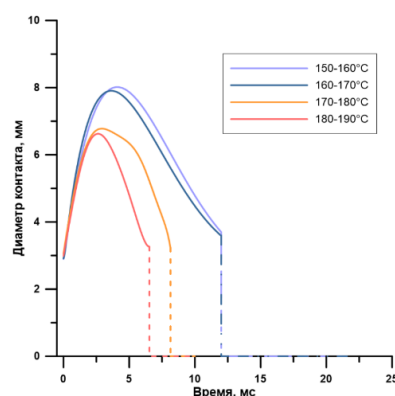


Рис. 3. Зависимость контактного диаметра от времени. Пунктирной линией схематически показано примерное время прекращения контакта.

### Список литературы:

- Gatapova E. Ya., Gatapova K. B., Bubble dynamics in thin liquid film and breakup at drop impact, *Soft Matter*, 16, 10397–10404 (2020), <https://doi.org/10.1039/D0SM01882A>
- Gatapova E. Y., Sitenkov V. O., Sharaborin D. K., Visualization of drop and bubble dynamics on a heated sapphire plate by high-speed camera enhanced by stereomicroscope. *Journal of Flow Visualization and Image Processing* (2022) <https://doi.org/10.1615/JFlowVisImageProc.2022042253>
- Breitenbach, J., Roisman, I. V., Tropea, C. From drop impact physics to spray cooling models: a critical review. *Exp Fluids* 59, 55 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2514-3>

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-19-00581).



УДК 536.244

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА ТВЕРДОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА ПРИ ТАНГЕНЦИАЛЬНОМ ОБТЕКАНИИ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ В МОДЕЛЬНОЙ АДТ

Скибина Н.П., Фарапонов В.В.

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, Россия, Новосибирск, пр. Ленина, 36

Развитие и прогресс современных аэрокосмических технологий сопряжены с вопросами повышения скорости движения летательных аппаратов (ЛА) в атмосфере. В настоящее время проводятся работы по созданию и оптимизации модификации облика ЛА, решаются вопросы тепловой защиты, разрабатываются перспективные высокоэнергетические топливные композиции. Одним из направлений повышения энергетики топлив для прямоточных и гибридных ракетных двигателей является использование активных связующих с низкими температурами плавления и горения – полибутадиен, полиэтилен, парафин, каучук, резины и т.д.

Ввиду того, что поток окислителя в рабочем тракте взаимодействует с поверхностью потенциального горючего, вследствие аэродинамического нагрева происходит формирование неоднородного поля температуры в нем. В связи с этим целью работы является исследование влияния газодинамической структуры течения и сопряженного теплообмена на тепловое состояние горючего материала, предшествующего его плавлению и горению. Рассматривается низкотемпературный нереагирующий поток воздуха, который в экспериментах формируется в сверхзвуковой аэродинамической трубе кратковременного действия [1] и набегает на модельное тело [2], где внутри размещен полый цилиндрический наполнитель из твердого горючего материала с температурой плавления 325÷450К [3].

Задачами исследования является анализ структуры течения газа в канале, определение диапазона давления и температуры при изменении числа Маха от 5 до 6, оценки величины теплового потока от потока воздуха к твердому телу и эмпирическое подтверждение результатов вычислительного исследования, направленного на оплавление и унос материала вследствие аэродинамического нагрева.

В работе используются методы математического и физического моделирования. Математическая модель сверхзвукового движения воздуха состоит из уравнений Навье-Стокса с осреднением по Рейнольдсу, дополненных уравнениями полуэмпирической модели турбулентности Ментера [4, 5]. Рассматривается движение вязкого теплопроводного и сжимаемого газа, учет сопряженного теплообмена через граничное условие IV рода позволяет анализировать нестационарный сопряженный теплообмен, возникающий при

взаимодействии установившегося течения газа в канале с поверхностью твердого горючего материала, выполненного в виде правильного полого цилиндра с диаметром 20 мм [3]. Физическое моделирование в работе применяется для верификации результатов вычислительного исследования.

В ходе исследования установлено немонокотное распределение термодинамических параметров газа вблизи стенки, обусловленное взаимодействием ударных волн с пограничным слоем. Получено качественное соответствие распределений давления, полученных по результатам экспериментов и расчетов. Установлено, что при движении модельного тела с числом Маха 6 при температуре торможения 650К происходит изменение диаметра канала в наполнителе, выполненном из полиэтилена высокого давления, что отражается на движении фронта плавления с течением времени. Результаты вычислительного исследования подтверждены в ходе экспериментов с модельным телом в аэродинамической трубе, где в качестве наполнителя использовался полый цилиндр из парафина, для которого получено изменение массы и качественное изменение внутренней поверхности вследствие аэродинамического нагрева. Положение и количество участков оплавления соответствует данным, полученным в ходе вычислительного исследования.

### Список литературы:

1. Звезинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Часть I. Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551с.
2. Скибина Н. П., Тыртышный С.А., Фарапонов В.В. Экспериментально-теоретическое исследование распределения давления вдоль стенки при движении сверхзвукового потока газа в осесимметричном канале с внезапным расширением// Теплофизика и аэромеханика. – 2022. – Т. 29. – № 1. – С. 91-101.
3. Скибина Н. П., Фарапонов В. В. Исследование взаимодействия сверхзвукового течения газа с легкоплавким материалом в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя на твердом топливе //Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14. – №. 3. – С. 278-288.
4. ANSYS FLUENT 12.1 Theory Guide, Solver Theory. ANSYS Inc., 2010.
5. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 143 с.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания FSWM-2020-0036.*

УДК 531.3, 53.05, 532.5

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ И КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ КАВЕРНЫ В УЗКИХ ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ

Скрипкин С.Г.<sup>1,2</sup>, Цой М.А.<sup>1,2</sup>, Кашкарова М.В.<sup>1</sup>, Кравцова А.Ю.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Гидродинамическая кавитация возникает вследствие значительного ускорения потока при локальном понижении давления на поверхности тел различной геометрии. Обычно, исследование кавитационных процессов происходит в трехмерной постановке, когда область примыкания тела обтекания к стенкам рабочего канала играет важную роль при формировании и развитии каверн за счет возникновения поперечного градиента давления [1–2]. Для упрощения анализа кавитационных структур в потоке при сохранении входных параметров потока ( $Re > 10^5$ ) и угла атаки профиля реализовано решение с малым аспектным соотношением крыла в узком щелевом канале.

Исследование реализующихся в потоке каверн проводилось методом высокоскоростной визуализации с использованием камеры Photron fastcam nova s12 в вертикальном гидродинамическом стенде Института теплофизики СО РАН. Рабочий участок имел размеры  $120 \times 145 \times 1,2$  мм (ШхДхГ). Тело обтекания – крыло серии NACA0012 с закругленной задней кромкой по радиусу 0,4 мм с длиной хорды 60 мм и размахом 1,2 мм, равном глубине канала. Угол атаки составлял  $21^\circ$ . Степень турбулизации потока на входе в рабочий участок не превышала 1%.

В ходе экспериментальных исследований было обнаружено, что кавитационная полость, возникающая на подсосывающей стороне крыла NACA0012 в узком щелевом канале, может находиться в двух различных состояниях: нестационарном и квазистационарном. При этом, квазистационарное состояние достигается путем резкого увеличения расхода подаваемой жидкости с нулевой отметки до 6,8 м<sup>3</sup>/час в течении 10 секунд. Авторами работы на основе экспериментального моделирования потока было обнаружено обратное движение парогазовых полостей внутрь суперкавитационной каверны. При этом режимы затекания можно разделить на три группы: без затекания, с затеканием до задней кромки крыла, с затеканием до передней кромки крыла. Для каждого из состояний каверн с использованием цифрового анализа данных

высокоскоростной визуализации были рассчитаны характерные частоты.

Математическое моделирование процесса кавитации было проведено с использованием CFD-пакета STAR CCM+. Процесс полагался нестационарным. Для описания динамики потока была применена схема VOF. Турбулентность моделировалась при помощи k-ε модели. Взаимодействие газовой и жидкой фазы описывалось моделью VOF. На стенках задавалось условие непротекания, а на входе задавалась величина массового расхода.

Получена хорошая корреляция с частотными характеристиками, представленными по результатам математического моделирования режимов затекания в суперкавитационную полость, в работе [3]. Также с использованием анализа разложения по динамическим модам [4–5] выявлено три наиболее энергетические моды кавитационного обтекания тел в жидкости.

### Список литературы:

1. Saito Y., Takami R., Nakamori I., Itohagi T. Numerical analysis of unsteady behavior of cloud cavitation around a NACA0015 foil // Computer Mechanics. 2007. V. 40. P.85–96.
2. Sedlar M., Soukal J., Komarek M., Volkov A.V., Ryzhenkov A.V. Numerical Simulation of Interaction between Fluid and Vapor Structures in Multiphase Flow around Hydrofoil // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2018. V. 6. P. 1614–1624.
3. Li X., Li N., Wang G., Zhang M. Reverse motion characteristics of water-vapor mixture in supercavitating flow around a hydrofoil // Journal of Hydrodynamics. 2016. V. 28. № 5. P. 757–766.
4. Krake T., Reinhardt S., Hlawatsch M., Eberhardt B., Weiskopf D. Visualization and selection of Dynamic Mode Decomposition components for unsteady flow // Visual Informatics. 2021. V. 5. № 3. P. 15–27.
5. Higham J. E., Brevis W., Keylock C. J. Implications of the selection of a particular modal decomposition technique for the analysis of shallow flows // Journal of Hydraulic Research. 2018. V. 56. № 6. P. 796–805.

*Работа выполнена при поддержке гранта  
Российского научного фонда  
(проект № 19-79-10217).*

УДК 536.46

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАМЕНИ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТАЛЬНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ

Сластная Д.А.<sup>1,2</sup>, Хребтов М.Ю.<sup>1</sup>, Мулляджанов Р.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Быстрорастущий интерес к экологичным способам получения энергии ставит новые задачи в изучении процесса сжигания ископаемого топлива. Его высокая энергетическая эффективность является основной причиной широкого применения газовых турбин в энергетике, промышленности и транспорте. Активное использование природного газа в качестве основного источника получения энергии, приводит к значительным выбросам углеводородсодержащих веществ в атмосферу. Разработка надежных и прогнозирующих моделей численного моделирования газового горения позволит отслеживать и регулировать количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Корректное моделирование газового горения предполагает помимо подробного моделирования гидродинамических процессов учет детальных кинетических механизмов, принимая во внимание все физические и химические свойства газовых смесей. Использование подробных кинетических механизмов позволяет воссоздать истинную картину горения, но, в свою очередь, это требует значительных вычислительных мощностей. Основной сложность численного моделирования реалистичных камер сгорания является нахождение баланса между упрощением геометрии, сокращением кинетического механизма и наличием определенной вычислительной мощности.

Помимо этого, при моделировании газового горения, необходимо учитывать наличие одновременно жестких и нежестких систем нелинейных уравнений. Ввиду существования широкого диапазона времен протекания химических реакций, возникает жесткость химических уравнений, которая представляет фундаментальную роль в контроле производительности и надежности численных алгоритмов. Решением данной проблемы является использование метода расщепления Стрэнга [1], основанного на разделении слагаемых переноса и химических реакций, позволяющее миновать дорогостоящие матричные операции, при этом применять наилучший численный алгоритм для каждого члена уравнения.

Настоящая работа посвящена численному моделированию ламинарного предварительно перемешанного пламени метановоздушной смеси, истекающей из сопла Витошинского. В качестве основного инструмента моделирования был выбран расчетный пакет **laminarSMOKE** [2, 3], построенный на основе открытого вычислительного кода **OpenFoam**. Для разрешения гидродинамических свойств потока использовался метод конечных объемов (FVM: Finite Volume Method) в сжимаемой постановке. Уравнения набора

элементарных химических реакций, собранных в единый кинетический механизм, задавался как внешний файл с описанием реакций в формате **CHEMKIN**.

Проведена валидация расчетного пакета **laminarSMOKE** на основе экспериментальных данных, полученных методом PIV в лаб. 7.4 ИТ СО РАН [5]. На рисунке 1 представлено сравнение поля осевой компоненты скорости с данными эксперимента. Кроме этого, изучено поведение пламени метановоздушной смеси при наличии начальных возмущений в потоке вида:  $U=U_0(1 + \square \sin \omega t)$ . Основной сложностью численного моделирования возмущенного пламени является вероятность проскока пламени внутрь сопла (скорость фронта пламени оказывается выше скорости потока, следовательно фронт пламени устремляется к соплу). Пламя, зашедшее внутрь сопла, не имеет возможности выйти наружу, что является серьезной проблемой многих промышленных установок.

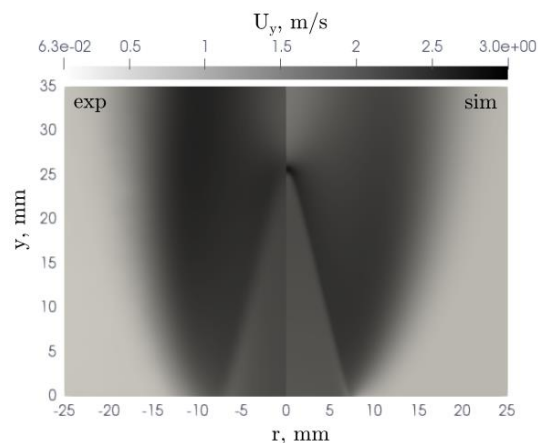


Рис. 1. Сравнение результатов численного моделирования (справа) осевой компоненты скорости с результатами эксперимента (слева).

### Список литературы:

1. Strang, Gilbert. "On the construction and comparison of difference schemes." *SIAM journal on numerical analysis* 5.3 (1968): 506–517.
2. Cuoci, Alberto, et al. "Numerical modeling of laminar flames with detailed kinetics based on the operator-splitting method." *Energy & fuels* 27.12 (2013): 7730–7753.
3. Cuoci, Alberto, et al. "A computational tool for the detailed kinetic modeling of laminar flames: Application to C2H4/CH4 coflow flames." *Combustion and Flame* 160.5 (2013): 870–886.
4. Dulin, V. M., et al. "On impact of helical structures on stabilization of swirling flames with vortex breakdown." *Flow, Turbulence and Combustion* 103.4 (2019): 887–911.

Работа поддержана грантом РФФ №22-19-00803.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОГО ТЕПЛОБМЕНА СИСТЕМЫ «ПОДЛОЖКА-ЛЕД»

Слепцов С.Д.<sup>1</sup>, Саввинова Н.А.<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>2</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,  
677000, Россия, Якутск, ул. Белинского, 58

Лед – распространенный в природе полупрозрачный материал. Прикладное применение результатов численного моделирования тепловых процессов в системе подложка-лед в условиях проникающего теплового излучения, может быть направлено на решение проблем, связанных с технологией устранения, разупрочнения льда на различных поверхностях. В работах [1] авторы экспериментально показали влияние материала подложек на интенсивность радиационного нагрева слоя льда до температуры плавления. В [2] авторы проводили эксперименты в климатической камере, где левая граница вертикальной подложки поддерживалась при постоянной низкой температуре и исследовалась интенсивность таяния льда в зависимости от спектрального состава источника теплового излучения. И в этой постановке задачи были проведены математические моделирования и верификация численных результатов исследования радиационно-кондуктивного теплообмена в плоском слое льда в [3-4]. В математической постановке задачи, использованной в [4], влияние теплопереноса в самой подложке не учитывалось, исходя из адиабатного условия на левой границе слоя льда. Целью данной работы является численное исследование температурного режима системы «подложка-лед» с учетом теплофизических свойств непрозрачных подложек.

Геометрически постановка задачи системы «подложка-лед» подобна [3]. В климатической камере с постоянной температурой внутри, на вертикальной подложке, по нормали к постоянно падающему потоку излучения от источника с температурой нити накаливания 3200 К, заморожен анизотропно рассеивающее излучение плоский слой льда. Спектральный состав излучения аналогичен [4]. Левая граница подложки поддерживается при постоянной температуре, на границе подложка-лед выполняется условие сопряжения, температурное поле в непрозрачной подложке определяется из решения уравнения теплопроводности.

Решение задачи радиационно-кондуктивного теплообмена в плоском слое льда проводится в два этапа. На первом этапе рассматривается нагрев плоского слоя льда до достижения правой облучаемой границей температуры таяния. Далее начинается второй этап – таяние льда, в процессе которого температура правой границы фиксируется и в этой точке выполняется условие Стефана. Математическая модель задачи плавления льда представляет собой однофазную постановку задачи Стефана. Численно определяются температурные поля, тепловые потоки, скорость таяния. Положение границы раздела фаз и рост температуры на необлучаемой стороне льда определяется из

решения краевой задачи. Учет анизотропного рассеяния излучения осуществляется транспортным методом [4].

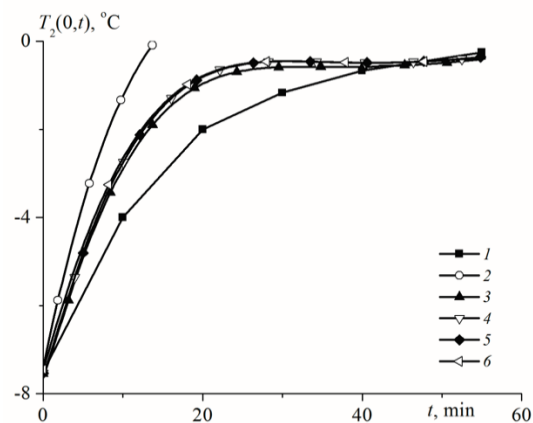


Рис. 1. Динамика роста температуры левой поверхности льда на разных подложках (1 – данные [2], 2 –  $A=A=0,01$ , 3 – подложка из бакелита, 4 – при  $A=A=1$ , 5 – при  $A=A=100$ , 6 – расчет по [4]).

Получены численные результаты скорости таяния льда и роста температуры необлучаемой поверхности льда при разных непрозрачных подложках. Показано, что при наличии теплопроводящих подложек в данной математической постановке нет необходимости учета теплофизических свойств подложки. Теплообмен существенно будет определяться оптическими свойствами подложек. Для подложек с низкими теплопроводящими свойствами становится важным реализация математической постановки задачи с граничными условиями для изолирующих материалов.

## Список литературы:

1. Savvinova N.A., Timofeev A.M., Malyshev A.V., Sleptsov S.D. Radiation Heating of Ice Formed on the Substrate // IEEE Xplore. 2020. 4 p. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271295
2. Seki N., Sugawara M., Fukusaki S. Radiative Melting of Ice Layer Adhering to a Vertical Surface // Wärme- und Stoffübertragung, 1979. Vol. 12. Iss. 2. P. 137-144.
3. Слепцов С.Д., Рубцов Н.А., Саввинова Н.А. Моделирование нагрева и таяния льда в приближении задачи Стефана с учетом излучения // ТИА. 2018. Т. 25. №3. С. 439-446.
4. Слепцов С.Д., Саввинова Н.А., Гришин М.А. Численное исследование теплового состояния льда содержащего пузырьки воздуха // ПМТФ. 2021. Т. 62. №3. С. 118-125.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН 121031800219-2.

УДК 536.248.2

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ С СУПЕРГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Совванши П.М.<sup>1</sup>, Чеверда В.В.<sup>1,2</sup>, Кабов О.А.<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Гидродинамика взаимодействия изотермической капли при падении на твёрдую поверхность в настоящее время хорошо изучена, но теплообмен при падении капли должен быть изучен для лучшего понимания происходящих процессов. Теплообмен между каплей жидкости и твёрдой поверхностью является одним из важных параметров при спрейном охлаждении. Впоследствии детальное понимание поможет в разработке эффективной системы охлаждения [1]. Столкновение капли с твёрдой поверхностью подразделяется на три последующие фазы, а именно: распространение, отступление и испарение от сидячей капли [2, 3, 4]. Теплопередача не зависит от диаметра и скорости ударного падения FC-72 [5]. Теплообмен и гидродинамика капли жидкости уникальна для выбранных жидкости и поверхности. Результаты одной конфигурации не могут быть сопоставлены с другой, что делает необходимым выполнение исследования для поставленных целей. Настоящее исследование направлено на создание двухфазной системы для охлаждения. В данной работе спрогнозирован порядок величины напряжения сдвига на подложке и теплового потока на подложке, возникающих при взаимодействии холодной капли с гидрофобной поверхностью.

Для численного расчёта толщина медной подложки составляет 2,5 мм. Допускается термическая диффузия жидкости во время растекания капли. При этом численное моделирование проводится с использованием сопряженного механизма теплопередачи. Движение трехфазной контактной линии допускается при отсутствии скольжения на твёрдой поверхности. Энергия поверхности прописывается с использованием равновесного и динамического контактного угла смачивания. Верхняя и боковые границы открыты в атмосферу. Тепловой поток и температура непрерывны на границе раздела твердое вещество-жидкость. Нижняя поверхность и окружающий воздух находятся при контрольной температуре (298K), а капли - на 5 K ниже эталонной температуры (293K). Теплофизические свойства считаются постоянными и принимаются при эталонной температуре. Изменение напряжения сдвига на стенке в зависимости от времени показано на рисунке 1(а). Напряжение сдвига на стенке прямо пропорционально динамической вязкости, скорости распространения и обратно пропорционально смещению объема жидкости в направлении, нормальном к скорости распростране-

ния. Динамическая вязкость воды меньше, чем у глицерина, следовательно результирующая скорость в воде больше, чем у глицерина. Пиковая величина напряжения сдвига на стенке в воде на 39,97% больше, чем у глицерина. Изменение теплового потока на стенке в зависимости от времени показано на рисунке 1 (б). Динамическая вязкость воды меньше, чем у глицерина. Результирующая скорость распространения в воде больше, чем у глицерина. Следовательно, колебания и конвекция являются доминирующими. Из числа Прандтля можно обнаружить, что импульс больше, чем теплопроводность в глицерине. Величина теплового потока у стенки, усредненная за период 0–0,5 мс для воды, на 75,29% больше, чем у глицерина.

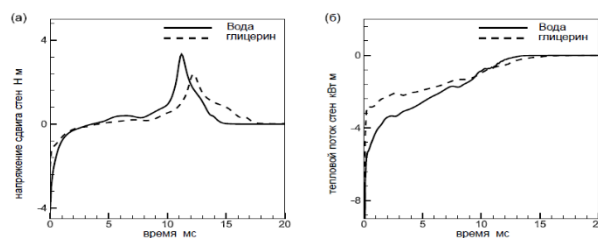


Рис. 1. (а) Напряжение сдвига и (б) тепловой поток на стенке в зависимости от времени, наблюдаемого при падении капли холодной жидкости с числом Бонда и Вебера 0,06 и 0,23 на супергидрофобную поверхность с краевым углом смачивания  $150^\circ$ .

### Список литературы:

1. Khandekar S., Sahu G., Muralidhar K., Gatapova E. Y., Kabov O. A., Hu R., Luo X., Zhao L., Cooling of high-power LEDs by liquid sprays: Challenges and prospects // Applied Thermal Engineering. 2021, 184, pp. 115640
2. Liang G., Mudawar I., Review of drop impact on heated walls // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017, 106, pp. 103–126.
3. Gholijani A., Schlawitschek C., Gambaryan-Roisman T., Stephan P., Heat transfer during drop impingement onto a hot wall: The influence of wall superheat, impact velocity, and drop diameter // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020, 153, pp. 119661.
4. Liu L., Zhang Y., Cai G., Tsai P. A., High-speed dynamics and temperature variation during drop impact on a heated surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022, 189, pp. 122710.
5. Schremb M., Borchert S., Berberovic E., Jakirlic S., Roisman I. V., Tropea C. Computational modelling of flow and conjugate heat transfer of a drop impacting onto a cold wall // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017, 109, pp. 971–980.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-79-10373.

УДК 621.9

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЕЛЬ РАЗЛИЧНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Старинская Е.М.<sup>1</sup>, Миськив Н.Б.<sup>1,2</sup>, Старинский С.В.<sup>1,2</sup>, Терехов В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630073, Новосибирск, ул. Пирогова 2  
prefous-lm@yandex.ru

Исследования в области испарения капель различных жидкостей проводятся десятилетиями и в настоящее время сохраняют свою актуальность [1]. Это связано с важной ролью, которую этот процесс играет в многочисленных технологических приложениях, например, при спрейном охлаждении поверхностей, при распыле жидких топлив в двигателях внутреннего сгорания, в теплообменных аппаратах и т.д. [2]. Исследования в данном направлении не потеряли своей актуальности и по сегодняшний день в силу необходимости решения новых задач в энергетике, химической технологии, биологии и медицине.

Заметное внимание уделяется исследованию испаряющихся капель наножидкостей. Хорошо известно, что добавление наночастиц в лакокрасочные изделия улучшают их свойства. Также за счет испарения наножидкостей можно переносить наночастицы на поверхность, тем самым формировать рисунок [3]. В этих вопросах крайне важно контролировать динамику испарения.

Стоит отметить, что имеющиеся данные о влиянии наночастиц на эффективность испарения капель обладают крайней противоречивостью. Исследователи наблюдают как значительную интенсификацию испарения [4], так и существенное торможение процесса [5]. А в ряде работ отмечается отсутствие влияния добавки наночастиц к базовой жидкости на скорость испарения [6, 7], либо это влияние весьма слабое [8, 9]. В настоящее время достаточно сложно дать исчерпывающие объяснения этим результатам, что является следствием исключительно сложной физики явлений и многофакторности изучаемого процесса. В свою очередь, прямое экспериментальное наблюдение за кинетикой движения наночастиц затруднено или невозможно.

Несмотря на большое количество работ по испарению капель наножидкостей, систематических экспериментальных данных по данной тематике в настоящий момент недостаточно. Накопленного исследовательского материала не хватает для ответов на существующие вопросы и устранения противоречий. Поэтому необходимы экспериментальные исследования в широком диапазоне параметров, таких как концентрация наночастиц, тип наночастиц, форма и размер.

В данной работе проведено экспериментальное исследование процесса испарения капли коллоидного раствора с разными типами наночастиц.

В результате проведенного исследования установлено, что добавление наночастиц увеличивает время испарения. Как известно, твердые частицы концентрируются на поверхности за счет испарения гораздо быстрее, чем они могут диффундировать к центру капли. Так в работе [10] авторы показали, что скопление большого количества частиц на границе вода-воздух заметно увеличивает скорость ее испарения, что связано с повышением давления паров над искривленной поверхностью. В нашем случае также можно ожидать, что наночастицы будут накапливаться на поверхности по мере испарения капли и по мере накопления частиц вблизи поверхности будет уменьшаться эффективная площадь контакта жидкости с воздухом.

### Список литературы:

- Walton D.E., The evaporation of water droplets. A single droplet drying experiment// *Dry. Technol.* 2004. V. 22. P. 431–456. <https://doi.org/10.1081/DRT-120029992>.
- Tsoy A.S., Snegirev A.Y. Large eddy simulation of fine water sprays: comparative analysis of two models and computer codes// *Thermophys. Aeromechanics.* 2015. V. 22. P. 609–620. <https://doi.org/10.1134/S0869864315050091>.
- Lin X.M., Jaeger H.M., Sorensen C.M., Klabunde K.J. Formation of long-range-ordered nanocrystal superlattices on silicon nitride substrates// *J. Phys. Chem. B.* 2001. V. 105 P. 3353–3357. <https://doi.org/10.1021/jp0102062>.
- Xu J., Yan X., Liu G., Xie J. The critical nanofluid concentration as the crossover between changed and unchanged solar-driven droplet evaporation rates// *Nano Energy.* 2019. V. 57. P. 791–803. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.013>.
- Yong X., Qin S., Singler T.J. Nanoparticle-mediated evaporation at liquid–vapor interfaces// *Extrem. Mech. Lett.* 2016. V. 7. P. 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2016.04.001>.
- Gerken W.J., Thomas A.V., Koratkar N., Oehlschlaeger M.A. Nanofluid pendant droplet evaporation: Experiments and modeling// *Int. J. Heat Mass Transf.* 2014. V. 74. P. 263–268. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.031>.
- Chan H.C., Paik S., Tipton J.B., Kihm K.D. Effect of nanoparticle sizes and number densities on the evaporation and dryout characteristics for strongly pinned nanofluid droplets// *Langmuir.* 2007. V. 23. P. 2953–2960. <https://doi.org/10.1021/la061661y>.
- Chen R.H., Phuoc T.X., Martello D. Effects of nanoparticles on nanofluid droplet evaporation// *Int. J. Heat Mass Transf.* 2010. V. 53. P. 3677–3682. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.04.006>.
- Chen R.H., Phuoc T.X., Martello D. Surface tension of evaporating nanofluid droplets// *Int. J. Heat Mass Transf.* 2011. V. 54. P. 2459–2466. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.016>.
- Lin K., Chen R., Zhang L., Shen W., Zang D. Enhancing Water Evaporation by Interfacial Silica Nanoparticles// *Adv. Mater. Interfaces.* 2019. V. 6. P. 1–7. <https://doi.org/10.1002/admi.201900369>.

УДК 535:621.37

## РАСТЕКАНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ НА ПЕРЕГРЕТЫХ СУПЕРГИДРОФОБНЫХ И СУПЕРГИДРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ИДЕНТИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ

Старинский С.В.<sup>1,2</sup>, Шухов Ю.Г.<sup>1</sup>, Сафонов А.И.<sup>1</sup>, Старинская Е.М.<sup>1</sup>,  
Миськив Н.Б.<sup>1,2</sup>, Ли Ю.П.<sup>3</sup>, Терехов В.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

<sup>3</sup> School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology,  
116024, Dalian, China  
starikhbz@mail.ru

Интенсивные исследования взаимодействия капель жидкости с нагретыми твердыми поверхностями связаны с широким спектром существующих приложений. Остается открытым вопрос влияния смачиваемости поверхности на динамику тепломассообмена при падении капель на разогретые поверхности. Имеющиеся в литературе данные достаточно разрознены [1, 2]. Выявление ключевых аспектов в модельных экспериментах затруднено использованием поверхностей не только с различным смачиванием, но и различной морфологией. Уже было показано, отличие динамики растекания падающих капель на холодных поверхностях с исходно близкими равновесными красными углами смачивания, но различной морфологией [3].

В данной работе мы использовали супергидрофильные и супергидрофобные подложки с идентичными морфологическими характеристиками на нано- и микроуровне. Образцы были получены с помощью методики, комбинирующей лазерную обработку и последующую химическую функционализацию. В качестве опорного материала был выбран монокристаллический кремний. Супергидрофильные свойства достигались при лазерной обработке импульсами наносекундной длительности инфракрасного диапазона [4]. Последующая гидрофобизация поверхности осуществлялась нанесением тонких слоев фторполимерного покрытия методом HW CVD [5].

С помощью высокоскоростной съемки была проанализирована динамика растекания капель воды на подложках с различным смачиванием в широком диапазоне чисел Вебера  $We=3-120$ . В экспериментах варьировалась температура поверхности подложек вплоть до  $300^{\circ}\text{C}$ . Найдено, что на инерциальном этапе растекания форма капли слабо зависит от типа используемой подложки. Однако, на супергидрофильной поверхности наблюдается вскипание и разбрызгивание жидкости вблизи контактной линии. Вязкий этап растекания существенно отличен на разных поверхностях. Так, на супергидрофильном материале уже в конце инерциального режима течения наблюдалось вскипание по всему объему капли с последующим образованием струи. На супергидрофобной поверхности капля остается стабилизированной в течении длительного времени, а интенсивное кипение наступает на этапе ее полного растекания по поверхности. Таким образом, на поздних временах (более 2 мс) вода продолжает контактировать с супергидро-

фобной поверхностью, в то время как на супергидрофильной происходит полный унос жидкости. Полученные данные важны с точки зрения разработки стратегии дизайна микро текстурированных поверхностей в задачах спрейного охлаждения.

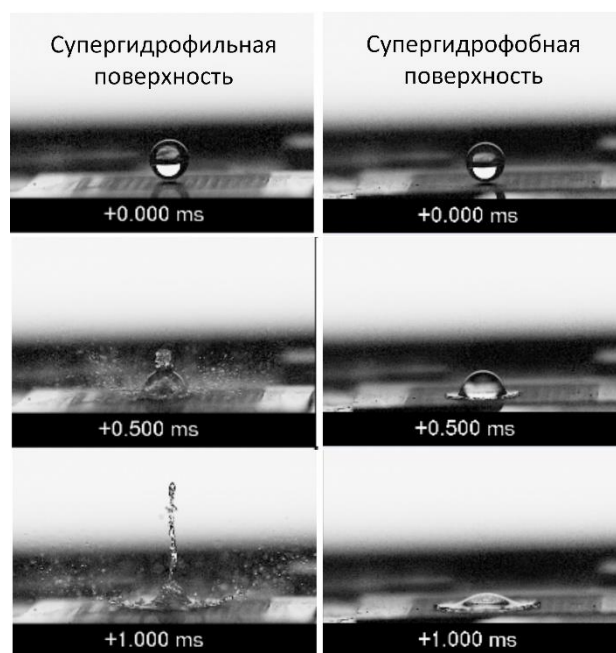


Рис. 1. Динамика растекания капли воды, падающей при  $We=118$  на супергидрофильную и супергидрофобную поверхности нагретые до  $276^{\circ}\text{C}$ .

### Список литературы:

1. Kim S.H. et al. Leidenfrost point and droplet dynamics on heated micropillar array surface // *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2019. Vol. 139. P. 1–9.
2. Ma Q. et al. Droplet boiling on heated surfaces with various wettabilities // *Appl. Therm. Eng.*, 2020. Vol. 167, P. 114703.
3. Wang F., Fang T. Retraction dynamics of water droplets after impacting upon solid surfaces from hydrophilic to superhydrophobic // *Phys. Rev. Fluids.*, 2020. Vol. 5, № 3. P. 1–20.
4. Starinskiy S. V. et al. Formation of periodic superhydrophilic microstructures by infrared nanosecond laser processing of single-crystal silicon // *Appl. Surf. Sci.*, 2020. Vol. 512, 2019. P. 145753.
5. Starinskiy S. V. et al. Transition from superhydrophilic to superhydrophobic of silicon wafer by a combination of laser treatment and fluoropolymer deposition // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2018. Vol. 51, № 25.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 21-52-53025 ГФЕН\_а.

УДК 621.9

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ БРОМИСТОЛИТИЕВЫХ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРОВ В ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ РОССИИ

Степанов К.И.<sup>1</sup>, Мухин Д.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Абсорбционные бромистолитиевые термотрансформаторы (АБТТ) получили широкое распространение в мире в качестве холодильных машин и тепловых насосов. Холодильные машины (АБХМ) используются для охлаждения жидкостей систем кондиционирования воздуха и технологического оборудования в различных производствах. Тепловые насосы (АБТН) применяются для утилизации сбросного техногенного тепла с одновременным нагревом обратной сетевой воды отопления (ОСВ) и горячего водоснабжения (ГВС). С применением АБТН снижается потребление первичного топлива и тепловое загрязнение окружающей среды.

АБТН широко используются в мире в центральных системах теплоснабжения. Основными причинами широкого внедрения являются; высокие цены на топливо, борьба за снижение выбросов парниковых газов, а также относительно низкая температура ОСВ, не превышающая 50 °С. Низкая температура ОСВ отчасти связана с более мягким зимним климатом. Однако в большей степени это связано с тем, что в западных и азиатских развитых странах используются отопительные приборы с принудительной циркуляцией воздуха, а также используются системы с «теплыми» полами, существенно снижающие температуру ОСВ.

Однако в России АБТН не получили широкого распространения. Здесь был реализован всего один проект с внедрением АБТН в системе отопления (здесь реализована автономная, а не централизованная система отопления): В 2005 г. В Краснодарском крае в тепличном комплексе ОАО «Юг-Агро» были установлены два тепловых насоса АБТН-600Т с газовым обогревом, предназначенные для отопления [1]. В качестве источника утилизируемой теплоты использовалась геотермальная вода из скважины с температурой до 90°С. Сначала геотермальная вода поступала в подогреватели сетевой воды отопления, где охлаждалась до температуры 40–45°С. После этого геотермальная вода подавалась в испарители АБТН где её теплота утилизировалась с охлаждением до 20–25°С. АБТН-600Т использовались для нагрева сетевой воды отопления с 40–45°С до 75°С.

Возможному внедрению АБТТ в теплоэнергетике России препятствует несколько факторов: низкие цены на топливо (1), высокая температура ОСВ (до 70°С) (2), использование отопительных приборов с естественной конвекцией воздуха (3). Факторы (1) и (3) неразрешимы в ближайшей перспективе. Снижение температуры ОСВ в России в централизованных системах теплоснабжения также труднодостижимо.

Высокая температура ОСВ является серьёзным препятствием для работы АБТТ. В промышленных АБТТ стандартной конструкции имеется внутреннее функциональное ограничение, связанное со свойствами рабочего тела – водного раствора LiBr: он имеет ограниченную растворимость, вследствие чего давление водяных паров над раствором в равновесном состоянии имеет определённый предел. Чтобы обеспечить в АБТТ процесс абсорбции, перепад температур между охлаждающей (нагреваемой) и охлажденной жидкостью не должен превышать 25°С. При превышении данной величины интенсивность абсорбции в АБТТ снижается и, как следствие, снижается эффективность работы АБТТ в целом. Если перепад превышает 30°С происходит прекращение процесса абсорбции в АБТТ. Таким образом, для работы АБТТ при температуре охлажденной жидкости 25°С (температура при которой возможна утилизация сбросной теплоты) температура ОСВ не должна превышать 50°С.

Одно из возможных решений данной проблемы было предложено в [2]. Здесь представлена система глубокой утилизации продуктов сгорания газовой котельной на основе АБТН с двухступенчатой абсорбцией и бесконтактным теплообменником утилизатором. АБТН осуществляет предварительный нагрев ОСВ с температурой до 70°С. Окончательный нагрев ОСВ осуществляется в водогрейном газовом котле. За счет применения второй ступени испарения и абсорбции требуемый перепад температур между охлажденной и охлаждающей (нагреваемой) жидкостью  $\Delta t_{ws}$  может достигать 45–50°С, и это позволяет эксплуатировать АБТН для нагрева ОСВ в теплоэнергетике РФ. Однако стоимость АБТН с двухступенчатой абсорбцией существенно больше, чем стоимость промышленного АБТН с одноступенчатой абсорбцией. Срок окупаемости АБТН с учётом стоимости природного газа в РФ достигает 10 лет и может быть снижен, только если задействовать АБТН для выработки холода в летний период.

### Список литературы:

1. Горшков В.Г., Паздников А.Г., Мухин Д.Г., Севастьянов Р.В. Промышленный опыт и перспективы использования отечественных абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин и тепловых насосов нового поколения// Холодильная техника – 2007. – № 8. – С. 23–31.
2. Stepanov K. I., Mukhin D. G. Efficiency of a Lithium Bromide Absorption Thermotransformer with Two-Stage Absorption in the Structure of Gasified Power Plants// Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 68. – No. 1. – pp. 37–44. – DOI:10.1134/S0040601520120095.



УДК 532.517

## ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПЛОСКОЙ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Степашева Е.Д., Засимова М.А., Иванов Н.Г., Подмаркова А.Д.

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

Приточные струи, распространяющиеся в ограниченном пространстве, к примеру, при вентиляции помещений или технических устройств, позволяют обеспечить достаточный уровень скоростей и температуры в вентилируемом объеме для поддержания заданных параметров теплового комфорта. В некоторых вентилируемых устройствах важно оценивать теплоотдачу от поверхности нагретых или охлажденных стенок вентилируемого объема, которая существенно зависит от глобальной структуры течения. При определенных условиях в вентилируемых пространствах могут развиваться автоколебания (см., к примеру, [1]), которые существенно влияют на локальные и интегральные характеристики течения и теплоотдачу от твердых поверхностей.

В [2] приведены обширные экспериментальные данные о распространении плоской изотермической воздушной струи в полость. Показано, что в зависимости от положения сопла в полости формируются как стационарные, так и нестационарные режимы течения. В докладе представляются данные численного моделирования автоколебаний струи в тестовом ограниченном пространстве [2] в изотермических и неизотермических условиях.

Плоская воздушная струя подается через сужающееся сопло в прямоугольную полость (рис. 1а) высоты 20 см, длины 50 см и ширины 20 см. Внутренняя область сопла не входит в расчетную область, а входное граничное условие задается на поверхности выходного сечения сопла. Высота щели, через которую воздух поступает в полость, равна 1 см, ее ширина совпадает с шириной полости. Центр сопла расположен на высоте 10 см от нижней границы полости и на расстоянии 10 см от открытой границы.

На срезе сопла задавалось однородное распределение скорости 6 м/с, что соответствует числу Рейнольдса 4000. Для вариантов с неизотермическими условиями нагретые стенки полости поддерживались при постоянной температуре 37...87°C, температура струи задана постоянной и равной 27°C.

Моделирование турбулентности выполнено как на основе вихререзающего подхода – метода моделирования крупных вихрей (LES), так и на основе URANS подхода с использованием различных полуэмпирических моделей турбулентности. Эффекты плавучести учитывались в приближении Буссинеска.

Используются расчетные сетки, построенные в генераторе ICEM CFD, состоящие из гексагональных элементов. Для URANS расчетов размерность сеток составила 0.1...6 миллионов ячеек, для LES – 6.5...20 миллионов ячеек. Расчеты проведены в пакете ANSYS Fluent с использованием ресурсов СКЦ «Политехнический» (scc.spbstu.ru).

Получено, что для рассматриваемого положения сопла в полости данные LES (рис. 1а) и URANS (рис. 1б) моделирования предсказывают нестационарный режим течения с периодическими низкочастотными (0.64 Гц) колебаниями струи. Частота и амплитуда колебаний, полученными в LES и URANS (с моделью  $k-\omega$  SST) расчетах с изотермическими условиями, согласуются между собой и с данными эксперимента (рис. 1в).

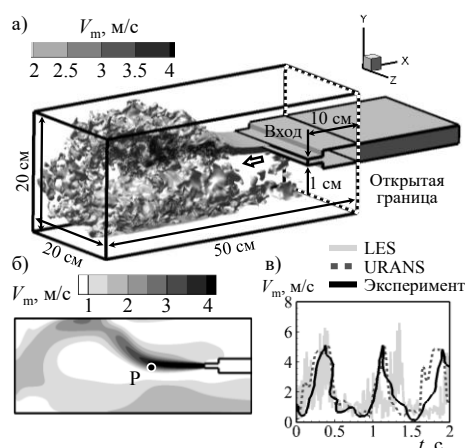


Рис. 1. а) Изоповерхности мгновенной скорости (данные LES), б) поле скорости в центральном сечении (данные URANS, модель  $k-\omega$  SST), в) эволюция скорости в точке P.

Частота колебаний, полученная в неизотермическом варианте с перепадом температуры 10°C, на 6% отличается от полученной в изотермическом варианте, при этом амплитуда колебаний не меняется.

Теплоотдача от стенок полости изменяется на протяжении периода колебаний струи: осредненные по поверхности верхней и нижней стенок полости значения теплосъема могут достигать  $\pm 35\%$  от осредненного по времени значения теплосъема, для торцевой стенки это значение ниже,  $\pm 23\%$ . Осредненное по времени и по поверхности торцевой стенки значение теплосъема в два раза ниже среднего значения теплосъема осредненного по поверхности нижней или верхней стенки.

### Список литературы:

1. Markov D., Ivanov N., Pichurov G. et al. On the procedure of draught rate assessment in indoor spaces // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. 5036. 20 p.
2. Mataoui A., Schiestel R., Salem A. Flow regimes of interaction of a turbulent plane jet into a rectangular cavity: experimental approach and numerical modelling // Flow, Turbulence and Combustion. 2001. Vol. 67. P. 267–304.

Исследование выполнено при поддержке гранта  
РНФ № 22-29-00224.

УДК 536.2

**ДИНАМИКА СОРБЦИИ ПАРОВ ВОДЫ В СИСТЕМЕ «ХЛОРИД ЛИТИЯ/СИЛИКАГЕЛЬ»:  
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КОМПАКТНЫХ СЛОЯХ СОРБЕНТА**

**Стрелова С.В., Гордеева Л.Г., Аристов Ю.И.**

Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 5  
gordeeva@catalysis.ru

В настоящее время Адсорбционное Преобразование Теплоты (АПТ) зарекомендовало себя как экологически чистая и энергосберегающая альтернатива традиционным компрессионным холодильникам и тепловым насосам. АПТ позволяет эффективно использовать низкотемпературное (< 120°C) тепло возобновляемых источников энергии (солнечное тепло), а также тепловые отходы промышленности, транспорта и жилищно-бытового сектора для целей отопления и охлаждения. Однако широкому внедрению систем АПТ препятствует их низкая удельная мощность из-за медленных стадий адсорбции и десорбции рабочей жидкости [1]. Динамика адсорбции определяется процессом теплопереноса между слоем адсорбента и теплообменником (ТО), поэтому интенсификация теплопереноса позволяет увеличить удельную мощность устройств АПТ. Одним из способов интенсификации является консолидирование гранул адсорбента с поверхностью теплообменника с помощью связующего.

Композит на основе гигроскопичной соли LiCl, помещенной в поры силикагеля, является перспективным сорбентом паров воды для систем АПТ благодаря высокой сорбционной емкости (0.46 г/г) в условиях типичного цикла адсорбционного холодильника. Целью данной работы является изучение динамики сорбции паров воды на консолидированных слоях композита LiCl/силикагель, выявление влияния химической природы связующего и конфигурации слоя на коэффициент теплопереноса в системе и кинетику сорбции.

Динамика сорбции паров воды была изучена волюмометрическим методом Большого Скачка Температуры [2] в условиях типичного рабочего цикла адсорбционного холодильника. Были исследованы следующие конфигурации слоя сорбента: (а) монослой гранул композита размером 0,4–0,5 мм, свободнолежащих на металлической подложке (поверхность ТО), (б) такой же монослой, но гранулы консолидированы с подложкой с помощью связующего (рис. 1).

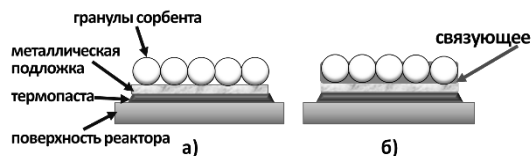


Рис. 1. Конфигурации слоя адсорбента: свободнолежащие гранулы (а) и консолидированный слой (б).

В качестве связующего использовали как неорганические (оксинитрат алюминия, теплопроводящий компаунд КПТД-1/3Т), так и органические (поливиниловый спирт ПВС) вещества. Процесс приготовления консолидированного слоя включал: 1) обработку поверхности алюминиевой подложки; 2) покрытие под-

ложки слоем связующего; 3) нанесение монослоя гранул сорбента; 4) сушка при комнатной температуре и затем при 80°C.

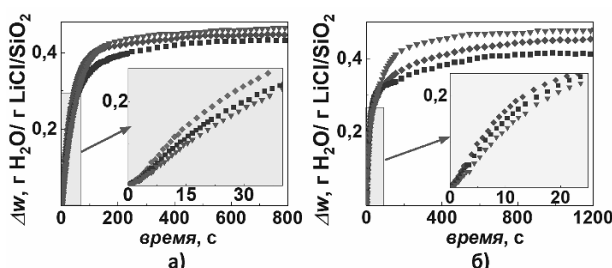


Рис. 2. Кинетические кривые сорбции паров воды при давлении  $P = 12.4$  мбар и скачке температуры  $74 \rightarrow 35^\circ\text{C}$  (а) и десорбции при  $P = 42.8$  мбар и скачке  $57 \rightarrow 100^\circ\text{C}$  для свободнолежащих гранул ( $\nabla$ ), и консолидированных слоев на основе КПТД ( $\blacklozenge$ ) и оксинитрата алюминия ( $\blacksquare$ ).

Показано, что начальные участки кинетических кривых (рис. 2) описываются экспоненциальным уравнением  $\Delta w(t)/\Delta w(t \rightarrow \infty) = 1 - \exp(-t/\tau)$ , где  $\tau$  – характеристическое время. Анализ скорости сорбции в начальный момент времени с учетом теплового баланса позволяет определить эффективный коэффициент теплопереноса  $\alpha$  между подложкой и сорбентом. Природа связующего оказывает значительное влияние на теплоперенос в системе и динамику сорбции паров воды. Так, применение ПВС не приводит к ускорению сорбции, по-видимому, из-за его низкой теплопроводности. Присутствие КПТД приводит к росту коэффициента теплопереноса от  $155 \pm 5$  Вт/( $\text{m}^2 \times \text{K}$ ) до  $260 \pm 20$  Вт/( $\text{m}^2 \times \text{K}$ ) и от  $140 \pm 5$  Вт/( $\text{m}^2 \times \text{K}$ ) до  $180 \pm 15$  Вт/( $\text{m}^2 \times \text{K}$ ) для сорбции и десорбции, соответственно. Это ускоряет как сорбцию, так и десорбцию воды (рис. 2) и увеличивает начальную удельную мощность (при  $t=0$ ) примерно в полтора раза.

Таким образом, использование слоя сорбента LiCl/силикагель, консолидированного с теплообменником с помощью КПТД, позволяет ускорить сорбцию паров воды за счет улучшения теплопереноса, повысить удельную мощность систем АПТ и сделать их более компактными.

Список литературы:

1. Meunier F. Adsorption heat powered heat pumps // Applied Thermal Engineering. 2013. V. 61. I. 2. P. 830–836.
2. Aristov Yu. I. et al. A new methodology of studying the dynamics of water sorption/desorption under real operating conditions of adsorption heat pumps: Experiment // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. V.51. I. 19–20. P. 4966–4972.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-23-00659).

УДК 532.5

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В СПРЕЯХ****Стрижак П.А., Ткаченко П.П., Шлегель Н.Е., Кропотова С.С.**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, 634050, пр. Ленина, 30

Взаимодействие твердых частиц и капель жидкостей реализуется в различных приложениях: в камерах сгорания энергетических установок [1,2], распылительных системах при приготовлении многокомпонентных смесей или разделении компонентов [3], при термической и огневой сушке жидкостей с примесями [4], в испарительных и теплообменных системах [5], химических реакторах [6], при тушении пожаров и дымоосаждении [7]. Во всех перечисленных приложениях процессы взаимодействия капель и частиц приводят к существенным изменениям дисперсности жидкостного аэрозоля и аэровзвеси твердых частиц. Это значительно влияет на характеристики гидрогазодинамических и теплообменных процессов. Как следствие, важно иметь теорию управления процессами взаимодействия твердых частиц и капель жидкостей с целью контроля характеристик этих процессов и структуры газопарокапельных потоков. К настоящему времени накоплена теоретическая и экспериментальная база данных с характеристиками процессов взаимодействия твердых частиц и капель жидкостей. Ряд наиболее значимых достижений мирового научного сообщества представлен в обзорной работе [16]. Однако неизученными остаются процессы соударения аэрозольных потоков жидкости с твердыми частицами, характерными для промышленных установок.

В настоящей работе по результатам экспериментальных исследований определены характеристики взаимодействия капель и частиц компонентов суспензионных топлив в спреях. Рассматривались столкновения капель воды с твердыми частицами бурого угля в результате взаимодействия аэрозольных потоков.

Процессы соударения капель жидкости с твердыми частицами регистрировались при помощи высокосортной видеокамеры Fastcam Mini UX100, при разрешении 1280×1024 pixels at 5000 fps, с межкадровой задержкой 1/25000. Высокосортная камера использована совместно с объективом Sigma 105mm f/2.8 EX DG OS HSM Macro Nikon F. Установлены основные параметры процессов взаимодействия капель и частиц: радиусы капель и частиц, их скорости движения, угол столкновения капель с частицами, а также расстояние между центрами масс частицы и капли. Систематическая погрешность измерения размеров капель и частиц, их скоростей движения и углов столкновения составила 2,1%, 3,4% и 1,8%, соответственно.

Подача твердых частиц осуществлялась с использованием пескоструйного пистолета с компрессором (изменение скоростей движения частиц осуществлялось за счет варьирования давления от 2 до 6 атм.). Для подачи жидкости использовалась специализированная форсунка. При обработке видеоклипов выделялось два ос-

новных режима взаимодействия: агломерация и фрагментация. Режим фрагментации характеризуется дроблением исходной капли за счет ее столкновения с частицей на группу вторичных фрагментов. Режим агломерации характеризуется слиянием исходной капли с твердой частицей в результате столкновения.

Результаты проведенных экспериментов обобщены в виде карт режимов соударений капель и твердых частиц в системе координат, учитывающей линейный параметр взаимодействия и число Вебера. Установлено, что для смешивания капель и частиц в топочных камерах оптимальными являются значения соотношения размеров капель и частиц более 4, что дает достаточно высокие скорости движения, которые обеспечивают промышленные сплинкерные и форсуночные устройства (более 5 м/с).

Результаты исследований представляют интерес для развития технологий вторичного измельчения капель топливных композиций. В частности, с их использованием можно прогнозировать достаточные для перехода между режимами и фрагментации условия для аэрозольных потоков капель и твердых частиц.

## Список литературы:

1. Yang C., Jeong J., Kim Y., Bang B., Lee U. Numerical simulation of a circulating fluidized bed combustor and evaluation of empirical models for estimating solids volume fraction // Powder Technol. 1997. V. 393. P. 786–795.
2. Stefanitsis D., Malgarinos I., Strotos G., Nikolopoulos N., Kakaras E., Gavaises M. Numerical investigation of the aerodynamic breakup of Diesel and heavy fuel oil droplets // Int. J. Heat Fluid Flow. 2017. V. 68. P. 203–215.
3. Wang P., Zhang K., Liu R. Influence of air supply pressure on atomization characteristics and dust-suppression efficiency of internal-mixing air-assisted atomizing nozzle // Powder Technol. 2019. V. 393–407.
4. Fröhlich J.A., Raiber T.V., Hinrichs J., Kohls R. Nozzle zone agglomeration in spray dryers: Influence of total solid content on agglomerate properties // Powder Technol. 2021. V. 390. P. 292–302.
5. Kunkel S., Teumer T., Dörnhofer P., Schlachter K., Weldeslasie Y., Kühn M., Rädle M., Repke J.U. Determination of heat transfer coefficients in direct contact latent heat storage systems // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 145. P. 71–79.
6. Malgarinos I., Nikolopoulos N., Gavaises M. Numerical investigation of heavy fuel droplet-particle collisions in the injection zone of a Fluid Catalytic Cracking reactor, Part I: Numerical model and 2D simulations // Fuel Process. Technol. 2017. V. 156. P. 317–330.
7. Fathinia F., Khiadani M., Al-Abdeli Y.M. Experimental and mathematical investigations of spray angle and droplet sizes of a flash evaporation desalination system // Powder Technol. 2019. V. 355. P. 542–551.
8. Pawar S.K., Henrikson F., Finotello G., Padding J.T., Deen N.G., Jongsma A., Innings F., Kuipers J.A.M.H. An experimental study of droplet-particle collisions // Powder Technol. 2016. V. 300. P. 157–163.

*Исследования выполнены за счет средств гранта  
Российского научного фонда (проект 18-71-10002-П,  
<https://rscf.ru/en/project/21-71-03001/>).*

УДК 532.5.032

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В КОНУСЕ МОДЕЛЬНОГО ЗАКРУЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**Суслов Д.А.<sup>1,2</sup>, Скрипкин С.Г.<sup>1,2</sup>, Литвинов И.В.<sup>1,2</sup>, Гореликов Е.Ю.<sup>1,2</sup>, Цой М.А.<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Нестационарные вихревые структуры, возникающие в закрученном потоке за рабочим колесом гидротурбины, порождают сильные пульсации давления, отрицательно воздействующие на надежность и безопасность конструкций гидроэлектростанции [1]. Они возникают в трехмерных, турбулентных и нестационарных потоках, что делает их изучение сложным как экспериментальными, так и численными методами. Условия, при которых возникает нестационарный вихрь, сильно зависят от типа и геометрии каждой турбины, напора и расхода, что затрудняет прогнозирование возникновения нестационарных явлений и не позволяет выработать единый подход при использовании современных методов контроля таких как инъекция газовой фазы или дополнительной струи воды. Это делает разработку аналитического подхода для выявления условий формирования прецессирующих вихревых структур в закрученных потоках, актуальной и востребованной задачей науки.

Для разработки математической модели нестационарных вихревых явлений представляется перспективным использовать технологии машинного обучения, которые помогут в интерпретации больших массивов экспериментальных и расчетных данных, содержащих распределения скоростей и пульсации давления для широкого класса закрученных течений, реализующихся в модели гидротурбины.

Цель настоящей работы заключается в создании экспериментальной базы для последующего использования нейронных сетей с целью эффективного и ресурсосберегающего прогнозирования характеристик вихревых структур на этапе проектирования новых гидротурбин. Притом, само по себе экспериментальное изучение вихревых структур позволяет получить интересные научные результаты о частотных и пространственных характеристиках данных вихревых структур при варьировании режимных параметров.

Был спроектирован и изготовлен универсальный рабочий участок, позволяющий варьировать число Рейнольдса потока, угол раскрытия диффузора, степень закрутки потока. Существенным упрощением при экспериментальном моделировании является замена водной среды на воздушную. Показано, что результаты, полученные на аэродинамических и гидродинамических стендах, хорошо согласуются [2].

В ходе работы выполнен обширный цикл экспериментальных исследований, включающих измерение распределений скоростей и их пульсационных составляющих с помощью лазерного доплеровского анемометра, а также возникающих пульсаций давления в закрученном потоке на стационарном завихрителем с обобщенной геометрией. Для каждого режима течения с использованием сигнала с четырех датчиков

давления были вычислены частота и амплитуда пульсаций давления, являющиеся основными критериями в дальнейшей классификации режимов.

Для каждой измеренной пары профилей скоростей, всего 1088 штук, был вычислен интегральный параметр закрутки потока. Установлено, что данный параметр закрутки потока линейно зависит от угла раскрытия направляющего аппарата в области малой и умеренной закрутки потока, а при дальнейшем увеличении закрутки выходит на постоянное плато.

Интересным представляется динамика зависимости значения осевой скорости на оси в измерительном сечении при варьировании интенсивности закрутки потока. Выделяется три характерные области параметра закрутки, по которым были объединены исходные данные. В первой области значение осевой скорости на оси практически не изменяется с ростом закрутки потока, однако при достижении значения параметра закрутки равного 0,25 наблюдается резкий скачок осевой скорости и появление значительного дефицита скорости на оси. Во второй области значение осевой скорости на оси монотонно и практически линейно от закрутки потока уменьшается до нуля. Затем следует третья область, которая начинается с резкого скачка скорости на оси. С увеличением закрутки потока значение скорости на оси уменьшается, вплоть до отрицательных значений и образования осевой зоны возвратного течения.

Внутри каждой из областей влияние варьирования угла раскрытия диффузора проявляется по-разному. В первой области изменение угла практически не влияет на значение скорости, а в других областях увеличение угла раскрытия диффузора приводит к монотонному уменьшению скорости на оси, достигая наибольшего эффекта при наибольших значениях параметра закрутки. Полученные данные говорят о том, что область распада вихря чувствительна даже к небольшому изменению граничных условий.

## Список литературы:

1. Müller A. et al. Fluid–structure interaction mechanisms leading to dangerous power swings in Francis turbines at full load //Journal of Fluids and Structures. – 2017. – Т. 69. – С. 56–71.
2. Skripkin S. G. et al. Comparative analysis of air and water flows in simplified hydraulic turbine models //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Т. 2150. – №. 1. – С. 012001

*Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФ в рамках проекта № 21-79-10080 (в части измерения профилей скоростей и пульсаций давления), а также в рамках государственного задания ИТ СО РАН (в части использования инфраструктуры и оборудования).*

УДК 621.9

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В ТОПКАХ ПАРОВЫХ И ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ

Сыродой С.В.<sup>1</sup>, Кузнецов Г.В.<sup>1</sup>, Саломатов В.В.<sup>2</sup>, Карелин В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский политехнический университет,  
630050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

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

Надо сказать, что разработанные к настоящему времени прогностические эконометрические модели [1] не смотря на все усилия апологетов возобновляемой энергетики показывают, что к 2040 году все равно большая часть тепловой и электрической энергии будет производится на тепловых электрических станциях, сжигающих различные топлива. Но интенсивное насыщения атмосферы земли парниковыми (ускоряющими процесс глобального потепления – диоксид углерода  $\text{CO}_2$ ) и высокотоксичными газами ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ) создает предпосылки для введения в общий баланс тепло- и электрогенерации новых экологически эффективных топлив и топливных композиций. Одним из наиболее перспективных технологических решений по существенному снижению концентрации антропогенных газов в продуктах сгорания является сжигание древесной биомассы.

Авторами [2] установлено, что при сжигании древесины образуется значительно меньше оксидов азота и серы. При этом предполагается, что биомасса является углерод-нейтральным топливом. Однако известно, что древесная биомасса является существенно влагонасыщенным материалом. Значение  $\phi$  зависит от вида древесины, условий ее хранения и технологии подготовки к сжиганию. Соответственно, можно обосновано полагать, что внутрипоровая влага будет оказывать существенное влияние на характеристики и условия зажигания такого топлива. Такая ситуация создает предпосылки для разработки и внедрения новых технологий топливосжигания. Одним из самых перспективных направлений является технология сжигания древесной биомассы в условиях сложного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева.

Воздействие СВЧ-излучения на топливные частицы, прежде всего, приводит к интенсификации процессов испарения внутрипоровой влаги и термического разложения основных компонентов биомассы. В результате все процессы термической подготовки протекают значительно быстрее. При этом стоит отметить, что такое дополнительное интенсивное тепловое воздействие должно приводить к значительному росту термических (обусловленных градиентом температур) и фильтрационных (вследствие движения водяного пара во внутрипоровой структуре топлива) напряжений. Последнее приводит к диспергированию приповерхностного слоя топлива и, соответственно, улучшает динамику горения.

Однако стоит сказать, что на настоящее время в мировой научной периодике нет публикаций с результатами экспериментальных и теоретических исследований процессов воспламенения частиц древесной биомассы в условиях сложного нагрева. По этой при-

чине цель исследований – оценка влияния микроволнового воздействия на процесс воспламенения частиц древесной биомассы.

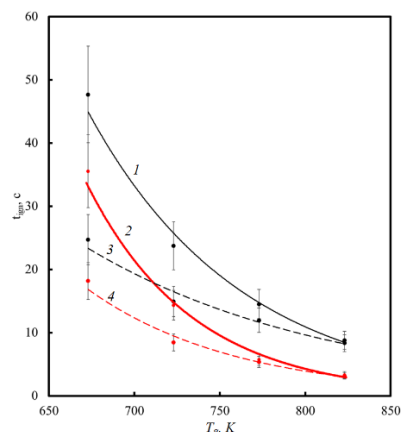


Рис. 1. Зависимости времени задержки зажигания древесных частиц в потоке высокотемпературной среды от температуры среды внешней среды при различных условиях нагрева: 1, 3 – зажигание при радиационно-конвективном нагреве; 2, 4 – зажигание при радиационно-конвективно-микроволновом нагреве; 1, 3 – влагонасыщенные частицы биомассы; 2, 4 – сухие частицы биомассы.

На рисунке 1 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц (влажной и сухой) древесины в условиях радиационно-конвективного и радиационно-конвективно-микроволнового нагрева от температуры внешней среды. Можно отметить, что и в этом случае микроволновая подсветка существенно ускоряет процесс воспламенения. При этом этот эффект более отчетливо проявляется при относительно низких температурах внешней среды. С увеличением  $T_g$  отличие значений  $t_{ign}$  уменьшаются, это связано с тем, что увеличение температуры внешней среды приводит к значительному росту интенсивности радиационного теплового потока. В результате вклад последнего становится настолько существенным, что роль микроволнового воздействия незначительна.

### Список литературы:

1. Clean Coal Engineering Technology/ B.G. Miller. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, United Kingdom 50 Hampshire Street, 5th Floor, Cambridge, MA 02139, United States
2. Jun Li, Weihong Yang, Włodzimierz Blasiak, Anna Ponzio. Volumetric combustion of biomass for  $\text{CO}_2$  and  $\text{NO}_x$  reduction in coal-fired boilers. Fuel. 2012. 102. P. 624–633.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 18-79-10015-П.

УДК 536.524

## ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛО - И МАССООБМЕНА ЧЕЛОВЕКА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ. ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ И НОВЫЕ ЗАДАЧИ.

Терехов В.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Проблема теплового взаимодействия тела человека с окружающей средой имеет огромное значение и ей уделялось самое пристальное внимание на протяжении всего существования homo sapiens. Первые научные и теоретические исследования в области биотеплофизики появились в начале прошлого столетия [1-4]. Несмотря на некоторую примитивность используемой измерительной и вычислительной техники, были получены принципиальные результаты по соотношениям компонентов тепловых потоков на поверхности кожи человека [5,6], что позволило позднее создать тепловую модель человека [7], и глубже понять природу терморегуляции человека.

Последующие более глубокие и детальные исследования [8,9], продолжающиеся и в наши дни [10,11], были инициированы несколькими важными практическими приложениями. Речь идет о создании систем жизнеобеспечения для авиации, космонавтики, морского флота, а также ряда технологий с экстремальными условиями работы: МЧС, пожарное дело, металлургия и др. Второе принципиальное направление связано с созданием комфортных условий для жизнедеятельности человека, в том числе и для его проживания. И, наконец, обширные исследования, активно развивающиеся в последнее время, связанные с обоснованием и разработкой новых теплофизических медицинских технологий – гипо – и гипертермии. В настоящее время методы глубокого охлаждения организма для проведения сложных хирургических операций при полном отключении кровообращения, а также локального или общего перегрева тела для лечения ряда патологий, стоят в основном на эмпирическом принципе. Все это создает предпосылки комплексного изучения теплофизических и физиологических проблем, возникающих в процессе нагрева или охлаждения тела человека.

В работе представлен преимущественно теплофизический аспект сложного процесса взаимодействия организма с окружающей средой. Обсуждаются существующие методы измерения тепловых параметров при реакции организма на изменение условий окружающей среды. Если измерения средних во времени температур хорошо отработаны, то данные по их пульсациям и тепловым потокам практически отсутствуют. На рис. показаны данные наших измерений, говорящие о высоком уровне тепловых флуктуаций. Обсуждаются соотношения компонентов тепловых потоков (кондукция, конвекция, радиация и испарение) при вариации внешних условий.

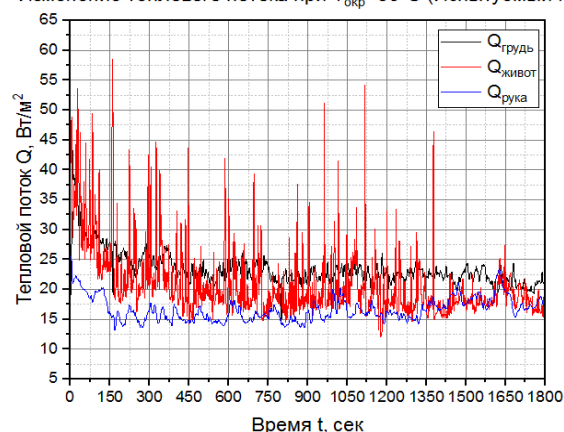
Изменение теплового потока при  $T_{окр}=30^{\circ}\text{C}$  (Испытуемый №1)

Рис. 1. Пульсации теплового потока на различных частях тела.

В работе обсуждается широкий спектр слабо изученных задач о тепловом состоянии человека в различных условиях, в том числе и экстремальных.

### Список литературы:

1. Bazett H.C. Studies on the effects of baths on man. Amer. J. of Physiology, 1924, 70 N2. 412–429.
2. Hardy J.D. The radiation of heat from the human body. I. Journal of Clinical Investigation 1934;13:593–604.
3. Christiansen S., Larsen T. On the heat radiating capacity of the human skin. Skandinavisches Archiv fur Physiologie 1935;72:11.
4. Nelson N., Eichna L.W., Horvath S.M., Shelley W.B., Hatch T.F. Thermal exchanges of man at high temperature. American Journal of Physiology 1947;51:626–52.
5. Mochida T. Convective and radiative heat transfer coefficients for human body. Transactions of AIJ 1977;258:63–9.
6. Colin J, Houdas Y. Experimental determination of coefficient of heat exchanges by convection of human body. J. of Applied Physiology 1967; 22(1):31–8.
7. Wissler E.H. Steady-state temperature distribution in man. J. Applied Physiology 16 (1961) 734–740.
8. Ishigaki H, et al. Experimental study on convective heat transfer coefficient of the human body. J. Thermal Biology. 1993, 18, 455–8.
9. O'Donovan T.S., Atmane M.A., Murray D.B. Induced heat transfer from human skin: its relationship to blood perfusion in the tissue. Advanced Comp. Methods in Heat Transfer VII, 2002 WIT Press, Ashurst Lodge, Southampton, SO40 7AA, UK.
10. Kurazumi Y., et al. Radiative and convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection// Building and Environment. 43 (2008) 2142–2153.
11. Wang L. et al. Human local and total heat losses in different temperature. Physiology & Behavior. 157, 1 2016, 270-276.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ - Соглашение 075-15-2021-575

## ЛАМИНАРНАЯ СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КОНВЕРГЕНТНОМ КАНАЛЕ

Терехов В.И.<sup>1</sup>, Экаид А.Л.<sup>2</sup>, Яссин Х.Ф.<sup>3</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,<sup>2</sup> University of Technology, Baghdad, Iraq<sup>3</sup> Technical Institute Hawija, Northern Technical University, Kirkuk, Iraq

Проблема интенсификации процессов теплообмена при свободной конвекции является одной из ключевых в широком спектре современных технологий. Особую остроту данная проблема получила при разработке современных устройств электронной техники, проектировании систем отопления и кондиционирования, когда использование вынужденной конвекции затруднено, либо полностью исключается. Важной областью применения результатов данного направления, является дизайн вытяжных и дымовых труб, а также строительных теплоизолирующих систем с вентилируемыми каналами. При этом, как это отмечается в большом числе исследований, в том числе и авторов Проекта, течения, формируемые стратифицированными по плотности средами, очень трудно поддаются интенсификации теплоотдачи и прирост теплообмена, как правило, обеспечивается развитием площади теплоотдающих поверхностей. Очевидно, что этот традиционный способ усиления теплосъёма имеет пределы, диктуемые габаритами тепловых радиаторов, их массой, стоимостью и т.д. По этой причине в последние годы можно наблюдать огромный интерес к поискам новых схем охлаждающих радиаторов (heat sinks) применительно к бурно развивающейся области тепловых технологий электронных гаджетов, компьютеров, смартфонов и других изделий. Работ в этом направлении и особенно прикладной направленности в литературе имеется большое количество. В то же время отмечается дефицит исследований фундаментального характера, на основании которых можно было бы проводить оптимизационный анализ и поиск наиболее эффективных схем охлаждения.

Типичным единичным элементом радиатора охлаждения, где происходит сброс теплоты в окружающую среду, является промежуток между теплопроводящими рёбрами, образующими прослойку, в которой формируется свободно-конвективное течение. Такое течение для условий охлаждения электроники является, как правило, ламинарным, и оно, несмотря на кажущуюся простоту, является исключительно сложным и многофакторным. Для относительно простого классического случая вертикальных прослоек с параллельными стенками при постоянных и равных температурах стенки (или тепловых потоков) получены обобщающие зависимости для интегральной теплоотдачи (Элен – Баас, Розенау, Бар – Коэн, Оллсон), позволяющие проводить многопараметрический анализ теплопереноса для сложных систем охлаждения.

Одним из возможных методов управления теплообменом является установка пластин под некоторым углом друг к другу, в результате чего течение разви-

вается в конвергентном (сужающемся), либо в дивергентном (расширяющемся) каналах. Исследований на эту тему не очень много, поэтому ряд аспектов этой задачи остались не изученными [1–3]. Это явилось основанием для проведения параметрического исследования характеристик теплообмена в двумерных прослойках, расположенных под различными углами относительно друг друга.

Настоящая работа посвящена численному исследованию ламинарной свободной конвекции в двумерном конфузормом канале при вариации в широких пределах угла наклона между стенками  $2\beta=0-60^\circ$  и числа Релея  $Ra=10^2-10^5$  и сопоставлению этих данных с течением и теплопереносом в каналах с параллельными стенками [4].

Изучаемая задача представляет собой течение между двумя бесконечно протяженными в поперечном направлении изотермическими пластинами одинаковой длины  $L$ , симметрично расположенные относительно вектора силы тяготения под углом  $\beta$ . Характеристики ламинарного течения и теплообмена в канале были получены из численного решения уравнений Навье – Стокса в двумерной постановке с использованием приближения Буссинеска. Рассматриваемая краевая задача имеет неизвестные условия на входе и на выходе между пластинами, поэтому расчетная область кроме пространства между пластинами включает два дополнительных прямоугольника у входа и выхода канала с мягкими граничными условиями.

В работе дан подробный анализ воздействия продольного ускорения на структуру течения, трение, конвективную тягу (число Рейнольдса между пластинами), локальную и интегральную теплоотдачу. Показано сильное влияние угла конфузора на аэродинамику течения и практическое его отсутствие на интегральный теплоперенос и величину расхода газа, создаваемого гравитационными силами.

## Список литературы:

1. Sparrow E.M., Ruiz R.L., Azevedo L.F., Experiments and numerical investigation of natural convection in convergent vertical channels // Int. J. Heat and Mass Transfer 31 (1988) 907–915.
2. Kaiser A.S., Zamora B., Viedma A. Correlations for Nusselt number in natural convection in vertical converging channels at uniform wall temperature by numerical investigation, Int. J. Heat and Fluid Flow 25 (2004) 671–682.
3. Bianco N., Langellotto L., Manca O., Nardini S. Thermal design and optimization of vertical convergent channels in natural convection // Appl. Thermal Engineering 26 (2006) 170–177.
4. Терехов В.И., Экаид А.Л., Яссин Х.Ф. Теплообмен при ламинарной свободной конвекции и отрывном течении за ребром в вертикальном канале с изотермическими стенками // Т и А, 2017, том 24, № 4, 593–597.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 21-19-00162).*

УДК 536.71;537.5;662.61

## ТОРМОЖЕНИЕ И УСКОРЕНИЕ ВСТРЕЧНЫХ ФРОНТОВ ГОРЕНИЯ В ПРОПАН-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ

Тесленко В.С., Дрожжин А.П.

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

Исследованы процессы сжигания стехиометрической пропан-кислородной смеси в кольцевых замкнутых объемах с диаметрами  $D=52-72$  mm, в постановке [1], и в линейных трубках диаметром  $d=5$  mm [2]. Иницирование горения осуществлялось искровыми разрядами (до 3), с синхронным запуском. Длительность искровых разрядов была в пределах 50 мкс, энергия варьировалась в интервале 0.08–2 Дж.

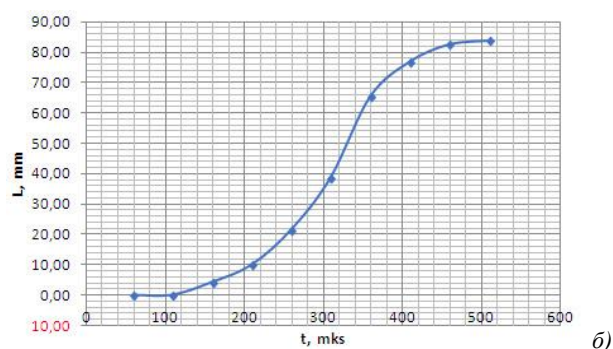
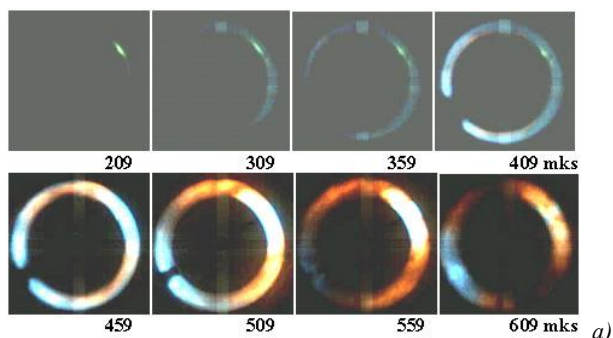


Рис. 1.

На рис. 1 и 2 представлены отдельные кадры фоторегиistroграмм (а), и соответствующие зависимости динамики фронтов горения (б) для вариантов одно-искрового (рис. 1) и двух-искрового (рис. 2) иницирования газовой смеси при давлении 1 атм.

Из экспериментальных результатов следует, что, для равных энергий искровых разрядов, в варианте одно-очагового иницирования мы наблюдаем вначале увеличение скорости фронтов горения до 300 м/с, затем торможение (рис. 1). В варианте двух-очагового иницирования наблюдается ускорение фронтов горения до 600 м/с. Во второй стадии, в противоположном направлении, скорость фронтов горения достигала 1800 м/с.

Обнаруженное ускорение горения и сжигания газа происходит за счет генерации газодинамического разлета искровых плазмодов, которые «факельно» обеспечивают горение в стехиометрической пропан-кислородной смеси.

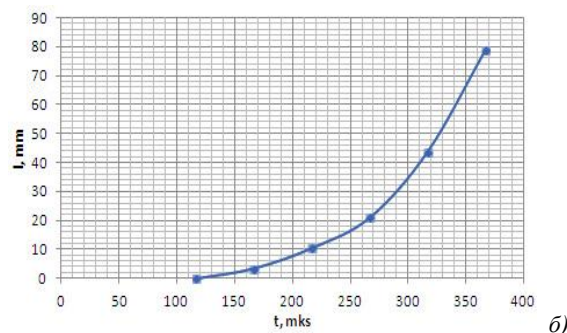
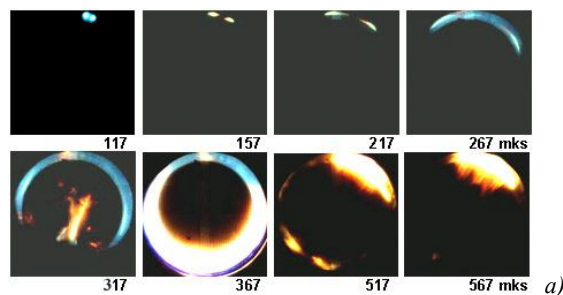


Рис. 2

Торможение фронтов горения происходят за счет наличия газодинамического потока «холодного» газа перед фронтом горения. Можно предполагать, что факельные фронты горения выполняют функцию неидеальных поршней, с генерацией локальных областей повышенного давления во встречных потоках.

Наличие газодинамических потоков холодного газа перед фронтами горения регистрировались с помощью щелевых зазоров, располагаемых на пути фронтов горения (например, на Рис. 2а см. кадр 317 мкс). При этом зажигание смеси происходило на расстояниях  $\sim 5d$  до регистрируемого фронта горения.

### Список литературы:

1. Тесленко В.С., Дрожжин А.П. Многоочаговое иницирование и горение пропана в макете цилиндра ДВС // Теплофизика и аэромеханика, 2021, том 28, № 5, С. 745–751.
1. Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н. Моделирование перехода горения в детонацию в цилиндрических пузырях с негладкой границей // Теплофизика и аэромеханика, 2017, том 24, № 6, С. 949–954.



УДК 614.839

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА ПРИ ГОРЕНИИ КРОВЛИ****Тетерюков А.В.<sup>1</sup>, Пастухов С.М.<sup>1</sup>, Чорный А.Д.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь,  
220118, Беларусь, Минск, ул. Машиностроителей, 25<sup>2</sup> Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
220072, Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 15

Возникновение пожаров в непосредственной близости от всевозможных строений либо горение самих этих строений является проблемой, связанной с возможностью переноса пожара на соседние жилые строения, растительный покров, технологические объекты и т. д. [1]. Это обусловлено тем, что тепловое излучение пожара, как вид электромагнитного излучения инфракрасного диапазона, падая на поверхность какого-либо объекта, поглощается данной поверхностью и преобразуется в тепловую энергию, вследствие чего температура объекта повышается [2].

Кроме того, тепловое излучение оказывает значительное отрицательное воздействие на пожарных-спасателей при тушении пожаров, когда пожарные вынуждены производить работы в нескольких метрах от места пожара. Известно [3], что воздействие теплового излучения от пожара становится болезненным для незащищенной кожи человека при интенсивности излучения более 2 кВт/м<sup>2</sup>, тогда как при излучении 12 кВт/м<sup>2</sup> мгновенно происходит ожог, а пожарный, использующий спецодежду из ткани плотностью 200 г/м<sup>2</sup> может получить ожог второй степени приблизительно через 90 секунд [4].

В связи с этим актуальным является определение теплового состояния поверхности зданий, окружающей среды около места пожара, а также изучение поведения основных газодинамических параметров газового потока вокруг жилых построек при наличии пожара в непосредственной близости к ним [5]. Определение этих параметров дает возможность прогнозировать дальнейшее поведение существующего пожара, и является одним из необходимых условий для принятия правильного решения при выборе мер по предотвращению возгорания близлежащих строений, а также для спасения населения [6]. Измерения потока теплового излучения на пожарах очень сложно и большую часть данных составляют расчетные и лабораторные исследования [5, 7].

В данной работе приводятся результаты компьютерного моделирования нестационарного конвективного и радиационного теплопереноса при горении кровли с учетом ее геометрической формы и фактиче-

ских размеров с расчетом изменения во времени распределения газодинамических и тепловых характеристик продуктов сгорания в окружающем кровлю пространстве.

Средствами компьютерного моделирования с применением специализированного программного обеспечения Ansys Fluent произведен расчет горения кровли с оценкой тепловых потоков и распределения температуры в пространстве около зоны горения.

По результатам проведенного расчета следует отметить, что интенсивность лучистого теплового потока (в среднем 8 кВт/м<sup>2</sup>) согласуется с результатами экспериментальных данных [8]. На датчиках величина температуры на различном расстоянии от горячей кровли растет со временем и также согласуется с экспериментальными данными. Для дальнейшего получения согласования требуется проведение полномасштабного сравнения экспериментальных измерений и результатов расчета.

**Список литературы:**

1. Пожарная и промышленная безопасность: Курс лекций по разделу «Пожарная безопасность» / сост. И.И. Полевода, С.М. Пастухов – Минск: КИИ МЧС Республики Беларусь, 2007. – 336 с.
2. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Д. Хауэлл. – М.: Мир, 1975. – 936 с.
3. Braun, E. Measurement of the protective value of apparel fabrics in a fire environment / E. Braun, D. Cobb, V.B. Cobble, J.F. Krasny, R.D. Peacock // Journal of Consumer Product Flammability, 1980. Vol. 7, N 1. P. 15–25.
4. Cohen, J.D. Relating flame radiation to home ignition using modeling and experimental crown fires / J.D. Cohen // Canadian Journal of Forest Research, 2004. Vol. 8, N 34. P. 1616–1626.
5. Снегирев А. Ю., Талалов В. А. Теоретические основы пожарной и взрывобезопасности. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 215 с.
6. ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования».
7. Forney G. P., Moss W. F. Analyzing and exploiting numerical characteristics of zone fire models // Fire Science and Technology. Vol. 14, N 1-2. 1994. P. 49–60.
8. Пастухов, С.М., Тетерюков А.В. Методика проведения экспериментальных исследований по определению геометрических параметров пламени при горении кровельных материалов / С.М. Пастухов, А.В. Тетерюков // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, 2018. Т. 2, № 2. С. 176–184.

УДК 532.529.5

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ БИОРЕАКТОРА

Тимкин Л.С., Горелик Р.С., Курдюмов А.С.

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

Культивирование микроорганизмов в промышленных условиях требует интенсивной аэрации для обеспечения популяции соответствующей газовой подкормкой. Для расчета таких аппаратов нужны достаточно точные данные по гидродинамике и массообмену течения в элементах биореактора, а именно – данные по опускному и подъёмному течениям в трубах разного диаметра при различных газосодержаниях, как в стационарных так и в неустановившихся режимах течения [1].

В данной работе с использованием электрохимической диагностики [2] проведены экспериментальные исследования газожидкостного опускного течения в вертикальной модели напорной части биореактора. В том числе, в верхнем и нижнем сечениях 15 мм рабочей трубы, включая и неустановившийся кольцевой режим течения.

В режимах течения с числами Рейнольдса течения  $Re_L=9300$  и  $Re_L=12750$  происходит перестройка течения, выражающаяся в плавном развитии напряжения трения на стенке трубы и перестройке профилей скорости жидкости ( $Vl$ ), пульсаций скорости жидкости ( $v_l'$ ) и газосодержания ( $Fi$ ).

В течении с  $Re_L=6180$  в верхнем сечении реализовывался кольцевой режим течения, переходящий в снарядно-пузырьковый режим в нижнем сечении. При этом в верхнем сечении регистрируется газонасыщенная пленка жидкости на стенке трубы, толщиной около 3,5 мм. В приосевой зоне течения ( $y>3,5$  мм) жидкость отсутствует и газосодержание потока равно 1. Напряжение трения на стенке в нижнем сечении равно  $1,183 \text{ Н/м}^2$  в верхнем  $11,7 \text{ Н/м}^2$ , что на порядок выше, чем в нижнем. Максимальная локальная скорость жидкости в верхнем сечении почти в 3 раза выше, чем в нижнем, см. рисунок. Вероятно присутствуют другие компоненты вектора скорости жидкости, которые могут приводить к закрутке жидкости на

входе в трубу. При этом, пульсации трения могут увеличивать на порядок величину среднего напряжения трения на стенке трубы [3].

Впервые проведены электрохимические измерения скорости жидкости и газосодержания в неустановившемся кольцевом газожидкостном течении, в условиях наличия толстой газонасыщенной пленки жидкости на стенках трубы.

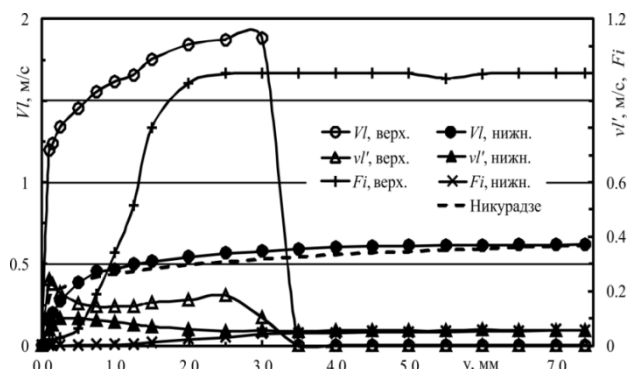


Рис. 1.  $W_L = 0,485 \text{ м/с}$ ,  $Re_L = 6180$ .

### Список литературы:

1. Nizovtseva I., Starodumov I., Schelaev A., Aks Zhlukov S., Sazonova M., Kashinsky O., Timkin L., Gasenko V., Gorelik R., Chenushkin D., Oshkin I. Simulation of two-phase air-liquid flows in a closed bioreactor loop: numerical modeling, experiments and verification // *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2021. P. 1-17. DOI: 10.1002/mma.8132.
2. Nakoryakov V.E., Burdukov A.P., Kashinsky O.N., Geshev P.I. Electrodiffusional method for studying local structure of turbulent flows // *Novosibirsk: Institute of Thermophysics*, 1986. 248 p.
3. Гавриленко С.И., Горелик Р.С., Егорова Е.И., Рандин В.В. Влияние режимных параметров на интенсивность пульсаций трения в закрученном газожидкостном потоке // *Газожидкостные течения*. Институт теплофизики. Новосибирск. 1990. 134с.

УДК 544.452.4, 543.42

## ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЛАМИНАРНОМ ПЛАМЕНИ НА ОСНОВЕ ЛИФ ГИДРОКСИЛЬНОГО РАДИКАЛА

Толстогузов Р.В.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Импактное горение встречается в большом количестве промышленных и технических приложений: при нагреве поверхностей, резке металлов, в камерах сгорания, горелочных устройствах, двигателях самолетов, химической промышленности и многих других областях. Однако, экологические требования к, например, авиационным двигателям и наземным энергоустановкам ужесточаются год от года. Для повышения эффективности сжигания и уменьшения габаритов камер сгорания крайне важны достоверные модели процессов теплообмена и факельного горения. Однако, проектирование новых и модернизация существующих систем невозможно без однозначного представления физических процессов, протекающих в камерах сгорания. Проведение эксперимента в реальных условиях на реальных установках неоправданно затратно и технически затруднительно. По этой причине при разработке новых горелочных устройств и камер сгорания применяются методы численного моделирования. Однако, численные методы моделирования, в особенности процессов горения, нуждаются в верификации результатов на более простых объектах. Данные, полученные с помощью эксперимента с применением современных оптических методов, позволят дополнить базу информации о процессах, протекающих при горении на модельных объектах.

Метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции позволяет регистрировать 2D-распределения температуры в потоке. Один из используемых в работе методов (Thermally-assisted LIF) основан на сравнении изменения интенсивности различных участков спектра флуоресценции гидроксильного радикала (OH) в зависимости от температуры [1]. Для реализации метода Thermally-assisted OH PLIF использовалась линия возбуждения  $Q_1(8)$  перехода (1–0) электронной системы  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ . Регистрация интенсивности сигнала флуоресценции производилась для переходов (2–0) и пары (1–1) и (0–0). Второй используемый в работе метод (Two-line LIF) основан на регистрации отношения интенсивности сигнала флуоресценции при возбуждении двух линий перехода в одно верхнее электронное состояние. В случае использования OH как возбуждаемой молекулы, производилось возбуждение перехода (1–0) (вблизи 282 нм) электронной системы  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$  и регистрации интенсивности излучения линий (1–1) и (0–0) (в диапазоне 300–320 нм). Для реализации метода Two-line OH PLIF использовалась комбинация двух линий  $Q_1(5)$  и  $Q_1(14)$  для перехода (1–0) в качестве одной из наиболее эффективных пар [2].

В настоящей работе данные методы были применены для исследования распределения температуры в импактном пламени Бунзена предварительно-перемешанной метавоздушной смеси, расположенного на расстоянии в один, два и три калибра от среза горелочного устройства с диаметром сопла 15 мм. Над соплом была установлена импактная поверхность, которая представляет собой цилиндрический металлический сосуд, температура в котором поддерживается постоянной с помощью термостата. Коэффициент избытка топлива для метановоздушной смеси  $\Phi$  был равен 0.92, число Рейнольдса составляло  $Re=1\ 000$ . Измерительная система состояла из перестраиваемого лазера на красителях, импульсного лазера накачки Nd:YAG и чувствительных в УФ диапазоне интенсифицированных ПЗС-камер. Изображения для переходов (0–0) и (1–1) были получены с помощью камеры Princeton instruments PI-MAX-4, оснащенной УФ-объективом и полосовым оптическим фильтром ( $310 \pm 10$  нм). Изображение для перехода (2–0) было получено с использованием ПЗС-КМОП камеры LaVision, оснащенной усилителем на основе УФ ЭОП (LaVision IRO). ЭОП был также оснащен УФ-объективом и полосовым фильтром ( $265 \pm 5$  нм).

С помощью коммерческого пакета программ LASKIN было проведено численное моделирование спектра флуоресценции OH ЛИФ, с целью определения границ применимости и подбора оптимальных параметров для реализации предложенных методов. В результате работы были получены реализации среднего поля скорости двумя предложенными методами. Проведено качественное сравнение результатов, полученными двумя методами. Установлено, что для случая в 3 калибра наблюдается зона возвратного течения с холодными продуктами горения. Было установлено, что максимальная температура наблюдается за фронтом пламени на границе внешнего слоя смешения.

### Список литературы:

1. Copeland C., Friedman J., Renksizbulut M. Planar temperature imaging using thermally assisted laser induced fluorescence of OH in a methane–air flame // *Exp. Thermal Fluid Sci.* 2007. Т. 31. С. 221–236.
2. Lobasov A. S., Tolstoguzov R. V., Sharaborin D. K., Chikishev L. M., Dulin V. M. On the efficiency of using different excitation lines of (1–0) two-line OH fluorescence for planar thermometry // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2021. Т. 28(5). С. 751–755.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН и при частичной поддержке РФФИ (№ 20-38-90164).*

УДК 621.039.634

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВОГО КОНТАКТА В СИСТЕМЕ КРЕПЛЕНИЯ ПАНЕЛИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В МОДУЛЕ БЛАНКЕТА ИТЭР

Томилов С.Н.<sup>1</sup>, Козлов С.А.<sup>1</sup>, Поддубный И.И.<sup>1</sup>, Свириденко М.Н.<sup>1</sup>, Лешуков А.Ю.<sup>1</sup>, Путрик А.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НИКИЭТ» 170140, Россия, Москва, ул. Малая Красносельская 2/8

<sup>2</sup> «Проектный центр ИТЭР», 123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова 1

Для защиты вакуумной камеры и магнитной системы реактора ИТЭР от теплового и нейтронного излучения со стороны плазмы, на внутренней поверхности вакуумной камеры размещены 440 модулей бланкета. Каждый модуль бланкета представляет собой сборочную единицу, состоящую из панели первой стенки (ППС) и защитного блока (ЗБ).

Панель первой стенки (рис. 1) также является сборочной единицей, включающей: несущую конструкцию первой стенки (НКПС), энергонапряженные компоненты (пальцы ПС), систему электрической связи с ЗБ и систему механического крепления.

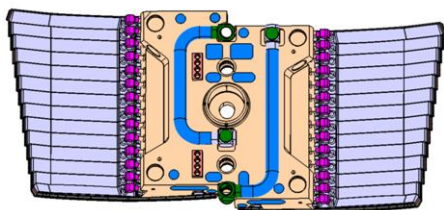


Рис. 1. Панель первой стенки (вид со стороны защитного блока).

Панель первой стенки соединяется с защитным блоком с помощью системы механического крепления, в состав которой входят 8 контактных электроизолирующих накладок и узел центрального болта (см. рис. 2).

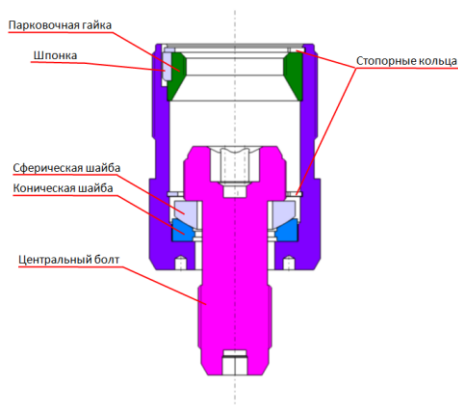


Рис. 2. Узел центрального болта.

Поскольку модуль бланкета подвергается значительным тепловым и нейтронным нагрузкам, внутри его составных частей предусмотрена система охлаждения. Ввиду расположения панели первой стенки ближе к плазме и наличию в конструкциях экспоненциально спадающего (к вакуумной камере) внутреннего энерговыделения, температуры в ней значительно выше, чем в защитном блоке. Соответственно, имеет место переток тепла в ЗБ в местах контакта с элементами системы крепления ППС.

Рассматривается влияние теплового контакта между стаканом узла центрального болта и ЗБ на распределение температуры в элементах системы крепления.

Для проведения оценки выбран модуль бланкета потолочного полоидального ряда №8. Выбор обусловлен спецификой несущей конструкции панели первой стенки (НКПС): узел центрального болта размещается в углублении НКПС.

Рассмотрены 2 варианта конструкции: 1) стакан системы крепления не контактирует с ответной частью в защитном блоке (контактная термическая проводимость – 0 Вт/(м<sup>2</sup>·°C)); 2) стакан системы крепления плотно прилегает к защитному блоку (контактная термическая проводимость – 1000 Вт/(м<sup>2</sup>·°C)).

Расчет проведен с использованием многофункционального расчетного кода ANSYS APDL. Элементы конструкции моделировались с помощью элемента SOLID70. Тепловые интерфейсы между элементами конструкции задавались с помощью контактных элементов TARGE170 и CONT174.

Поле температур в конструкции получено на основании решения нестационарного уравнения теплопроводности с учетом внутреннего энерговыделения в конструкциях и нелинейности свойств конструкционных материалов. В качестве граничных условий задавались: 3-мерное распределение объемного энерговыделения в конструкции, вызванное нейтронным потоком, тепловой поток падающий на центральную часть НКПС плотностью 0,16 МВт/м<sup>2</sup>, коэффициент теплоотдачи на стенках трактов охлаждения, полученный из решения уравнения гидродинамики, температура теплоносителя на входе в тракт системы охлаждения ППС – 70°C и температура на фланцах опор модуля бланкета – 100°C.

По результатам теплового расчета конструкции в нестационарной постановке для режима Inductive I (фаза «горение плазмы» – 400 с, фаза «пауза» – 1400 с), максимальное значение температуры в НКПС в обоих рассмотренных случаях составляет 403°C, что не превышает допустимого значения 450°C, специфицированного МО ИТЭР для стали марки 316L(N)-IG.

Тепловой контакт между стаканом системы крепления и защитным блоком позволяет снизить максимальную температуру стакана на 21°C – с 225°C до 204°C. Снижение температуры стакана позволяет снизить температуру головки центрального болта на 17°C – с 283°C до 266°C. Снижение температуры в болте позволит уменьшить влияние теплового расширения на осевую силу в болте в фазах «горение плазмы» и «пауза» режима Inductive I. Таким образом, при начальной осевой силе затяга центрального болта 600 кН, обеспечивается нераскрытие стыка в узле центрального болта и надежное закрепление ППС на ЗБ.

УДК 536.46

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА В ДИФфуЗИОННОМ ФАКЕЛЕ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Тупикин А.В., Лукашов В.В.

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

Сегодня активно развиваются оптические методы исследований, как неразрушающая диагностика фазовых и температурных полей, в том числе, реагирующих струй и пламени. С применением метода полихроматической гильбертовой визуализации полей фазовой оптической плотности получают пространственную структуру показателя преломления [1]. Встает актуальный вопрос интерпретации полученных данных с целью получения информации о распределении температуры и состава по пространству.

Показатель преломления является функцией температуры и состава  $(n-1) = f(T, r)$ . За основу одномерной методики восстановления распределения температуры и состава при диффузионном горении взято предположение об однозначной связи между этими параметрами в выбранной точке пространства.

На рис.1 представлена схема диффузионного факела, на которой выделены характерные области:  $x \leq x_0$  – топливо;  $x \geq x_{con}$  – окислитель и  $x = x_F$  – фронт пламени.

Пусть известно пространственное распределение показателя преломления  $(n-1) = f(x)$ . Для инициирования процедуры восстановления температуры и состава требуются стартовые распределения. Тривиальным начальным распределением является ступенчатая функция коэффициента избытка окислителя:  $\alpha = 0$  при  $x < x_F$  и  $\alpha = Const \gg 1$  при  $x > x_F$ .

Из уравнения Гладстона-Дале определяем температуру:

$$T(x) = \frac{T_{c.y.}}{(n-1)} \sum_k A_k \left(1 + \frac{B_k}{\lambda^2}\right) C_k, \quad \text{где}$$

$T_{c.y.} = 273$  К и  $p = 0.1$  МПа – стандартные условия,  $\lambda = 533$  нм, тем самым создавая стартовое распределение температуры. Далее строим безразмерный профиль:

$\theta(x) = \frac{T(x) - T_0}{T_{max} - T_0}$ . Запишем функцию тепловыделения

на единицу массы в единицу времени:  $\Delta Q = \frac{Hu}{1 + \alpha L_0}$

для  $\alpha > 1$  и  $\Delta Q = \frac{\alpha Hu}{1 + \alpha L_0}$  для  $\alpha < 1$ , где  $Hu$  – теплотворная способность топлива.

С другой стороны, функцию тепловыделения можно определить как:  $\Delta Q = C_{Pav}(T(x) - T_0)$ , где  $C_{Pav}(\alpha) = g_f C_{Pf} + g_{ox} C_{Pox}$  – средняя по процессу теплоемкость при постоянном давлении ( $g_f$  и  $g_{ox}$  – весовые доли топлива и окислителя). Отсюда получаем распределение  $\alpha(x)$ , по которому определяем равновесный состав и температуру. При расчете равновесного состава использовалась программная система TERRA, разработанная в ОИВТ РАН [2]. По необходимости процедуру можно повторить несколько раз.

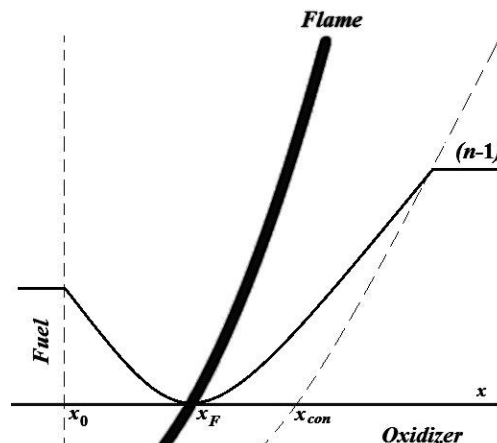


Рис. 1. Схема диффузионного факела.

Методика была протестирована на пространственном распределении коэффициента избытка окислителя:  $\alpha(x) = \frac{1 - \exp(-\beta(x - x_0)^2)}{L_0 \exp(-\beta(x - x_0)^2)}$ , где  $\beta = \frac{\ln(1 + L_0)}{(x_F - x_0)^2}$ ,  $L_0$  – стехиометрический коэффициент. Окислитель – воздух, топливо – водород. После пятикратного повторения отличие от истинных значений по концентрациям не превышало 2%, а по температуре 0.5%.

Данная процедура была применена к распределению  $(n-1) = f(x)$ , полученному в эксперименте, где топливо ( $H_2(25\%) + N_2(75\%)$ ) истекало из трубки с внешним диаметром 3.5 мм и внутренним 2 мм в атмосферу. Результаты восстановления температуры хорошо согласуются с температурой, полученной при применении регуляризации Тихонова [3].

Таким образом, можно сказать, что представленная методика работает достаточно корректно в случае диффузионного горения при наличии областей пространства с чистыми средами (топливом и окислителем).

### Список литературы:

1. Yu. N. Dubnischev, V. A. Arbuzov et al. Optical Hilbert Diagnostics of Hydrogen Jet Burning // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2019. V. 55. No 1. P. 16–19.
2. Б.Г. Грусев Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: «Приборостроение». 2012. С. 240–249.
3. Yu. N. Dubnischev, V. A. Arbuzov et al. Polychromatic diagnostics of the flame with Hilbert verification of the visualized phase structure // Scientific Visualization. 2021. V. 13. No 4, p. 1–8.

Исследование профинансировано Министерством науки и высшего образования РФ (грант № 075-15-2020-806, соглашение от 29 сентября 2020 года).

УДК 66-963

## ПРОДУКТЫ ДВУХСТАДИЙНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Ушаков К.Ю.<sup>1</sup>, Богомолов А.Р.<sup>1,2</sup>, Азиханов С.С.<sup>1</sup>, Петров И.Я.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева  
650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

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

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,  
650000, г. Кемерово, Советский пр-т, д. 18

Согласно ФЗ «Об отходах производства и потребления» в России с 2019 года официально запрещено захоронение шин. При этом в стране активно развиваются отрасли промышленности, в которых одним из отходов производства являются резинотехнические отходы (РТО), к которым относятся, в первую очередь, отработанные шины карьерных автосамосвалов, используемых при открытой добыче полезных ископаемых. Широкомасштабному внедрению имеющихся технологий утилизации и вторичной переработки изношенных шин в значительной степени препятствуют низкий спрос и большие энергозатраты на получаемые продукты [1]. В этой связи авторами проводятся исследования по созданию комплексной технологии термохимической конверсии РТО, основанной на проведении последовательных стадий их пиролиза и газификации с получением топливного газа, жидких углеводородов и углеродных сорбентов, имеющих повышенный спрос на мировых рынках.

Для установления влияния технологических параметров ведения процессов пиролиза и газификации на выход и качественные характеристики получаемых продуктов в качестве сырья использовались измельченные фракции крупногабаритных шин карьерных самосвалов, предоставленные компаниями АО «УК «Кузбассразрезуголь» и АО ХК «СДС-Уголь». Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке в проточном реакторе с рабочим объемом ~100 см<sup>3</sup>. В процессе пиролиза РТО образуются газообразные, жидкие и твердые (углеродсодержащий остаток) продукты. В свою очередь, на стадии углекислотной активации углеродсодержащего остатка образуются высококалорийный СО-содержащий газ и пористый углеродный материал.

Среди основных компонентов газообразных продуктов пиролиза РТО были идентифицированы Н<sub>2</sub> (45–67 об.%) и углеводороды состава С<sub>1</sub>–С<sub>4</sub> (31–47 об.%), в значительно меньшей степени – СО<sub>2</sub>, СО и Н<sub>2</sub>С. При этом, содержание водорода с повышением температуры пиролиза в целом увеличивалось, тогда как содержание углеводородов состава С<sub>1</sub>–С<sub>4</sub> снижалось. Получаемый пиролизный газ имеет достаточно высокую теплотворную способность (Q<sub>s</sub> ~19-22 МДж/м<sup>3</sup>) с повышенным содержанием Н<sub>2</sub>, что позволяет рекомендовать его к использованию в качестве высококалорийного топлива, а также в качестве сырья для выделения газообразного водорода. В составе полученных жидких продуктов следует отметить присутствие лимонена (до 36%) и других алкилпроизвод-

ных циклогексена, а также *n*-цимола (до 15%) и других алкилпроизводных бензола. В значительно меньшей степени в составе пиролизных жидкостей представлены производные нафталина, индена и высшие линейные. При этом обнаружено, что с увеличением температуры термообработки доля лимонена и алкилпроизводных циклогексена постепенно снижается, но относительное содержание алкилпроизводных нафталина и высших линейных углеводородов возрастает. Извлечение из жидких продуктов пиролиза резиновой крошки лимонена и *n*-цимола, обладающих высокой добавленной стоимостью [2], может существенно улучшить экономические показатели процесса пиролитической переработки РТО.

Образующийся твёрдый углеродный остаток процесса пиролиза, как было отмечено ранее, был подвергнут частичной углекислотной активации. С увеличением температуры процесса газификации (от 940 до 980°C) наблюдалось постепенное увеличение количества образующегося генераторного газа, а также отмечался рост содержания СО с уменьшением доли СО<sub>2</sub> в его составе (на 19,6 и 17,2%, соответственно). Установлено, что при температуре углекислотной активации ~960°C твёрдые остатки имеют наименьшие показатели адсорбционной активности по метиленовому голубому. Вероятно, это связано с тем, что при температуре активации 940°C твёрдый остаток характеризуется высокой концентрацией кислородсодержащих структур, обладающих повышенной сорбционной активностью и исчезающих с ростом температуры, что отображается на ИК спектрах образцов. В свою очередь, улучшение сорбционных свойств после активации при 980°C объясняется значительным ростом удельной поверхности образцов.

### Список литературы:

1. Иванов К.С., Сурикова Т.Б. Утилизация изношенных автомобильных шин. URL: <https://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=302> (дата обращения 28.05.2022).
2. Januszewicz K., Kazimierski P., Kosakowski W. Waste Tyres Pyrolysis for Obtaining Limonene // Materials. 2020. V. 13. N 6. Article 1359. <https://doi.org/10.3390/ma13061359>.

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Минобрнауки РФ в соответствии с дополнительным  
соглашением о предоставлении субсидии  
из федерального бюджета на финансовое  
обеспечение выполнения государственного задания  
на оказание государственных услуг  
(внутренний номер 075-ГЗ/Х4141/687/3).*

УДК 532.5

**КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ВТОРИЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ МИКРОВЗРЫВНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ****Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А.**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Вторичное измельчение многокомпонентных капель жидкостей считается одним из наиболее актуальных направлений развития топливных технологий [1]. Среди известных способов вторичного измельчения микровзрывная фрагментация считается наиболее продуктивной вследствие существенно большего роста площади поверхности жидкости в единицу времени [2]. В настоящей работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований взаимного влияния трех двухкомпонентных капель на характеристики микровзрывной фрагментации при варьировании расстояния между ними.

Для исследования процессов микровзрывной фрагментации трех капель при варьировании расстояния между ними использовались типичные для различных энергетических и топливных технологий жидкости: дизельное топливо, вода. Объемная концентрация дизельного топлива в исследуемых каплях варьировалась от 10 до 90%. Схема экспериментального стенда и методика проведения экспериментов, аналогична приведенной в работе [3].

Анализ количества и размеров вторичных фрагментов осуществлялся с помощью метода SP, для этого применялся код, разработанный в системе Matlab. На основании полученных данных строились распределения по размерам вторичных фрагментов. Основное внимание в настоящей работе уделено оценке вклада взаимного влияния соседних капель в группе на характеристики вторичных фрагментов, образующихся в результате микро-взрывного распада.

Результаты экспериментов показали, что расположенные ниже (т.е. во фронте) по потоку капли могут оказывать различное влияние на прогрев, испарение и микровзрывную фрагментацию соседних капель. При этом типичными режимами существования впередиидущих капель могут быть частичная или полная фрагментация в зависимости от условий нагрева. Для средней и позадиидущей капель наряду с режимами частичной и полной может реализовываться режим монотонного испарения при существенном снижении температуры вблизи их поверхности за счет влияния впередиидущих капель. Это, в первую очередь связано с различными скоростями прогрева границы раздела вода/топливо, т.е. граница раздела вода/топливо впередиидущих капель практически всегда прогревается быстрее, чем для средней и позадиидущей капель [3]. Данный эффект связан с тем, что натекающий на впередиидущую каплю разогретый газовый поток сдувает образующиеся пары с ее поверхности и уносит их в область, расположенную за каплей. Эта область также называется температурным следом. Результаты экспериментов [4] показали,

что характерные размеры температурного следа, расположенного за каплей, составляют 5–7 характерных радиусов капель.

С помощью варьирования температуры газового потока и расстояния между каплями можно обеспечить реализацию разных режимов фрагментации, а также управлять размерами вторичных фрагментов.

Полученные распределения по размерам вторичных фрагментов позволяют сделать вывод о том, что чем больше расстояние между родительскими каплями, тем больше вторичных фрагментов образуется при распаде каждой из них и тем меньше средний размер вторичных фрагментов. Это связано с тем, что чем больше расстояние между последовательно расположенными в потоке родительскими каплями, тем выше температура парогазовой смеси в малой окрестности каждой из них, слабо проявляется влияние соседних капель на температурное поле в системе в целом, соответственно, скорости их прогрева и испарения высоки. Также с поверхности капель в процессе нагрева и фрагментации срывались мелкие парожидкостные фрагменты, которые взаимодействовали с соседними каплями. При их контакте с соседними родительскими каплями в последних формировались дополнительные центры парообразования, что интенсифицировало их последующую фрагментацию.

За счет варьирования расстояния между последующими каплями, т.е. дисперсности капель в аэрозольном облаке, можно управлять размерами вторичных фрагментов от каждой из капель. Установлено, что при расположении исходных капель на расстоянии более 8–10 радиусов относительно друг друга размеры вторичных фрагментов от каждой из капель практически не отличаются, т.е. при такой дисперсности исходного аэрозоля топлива можно обеспечить заполнение камеры топливными фрагментами близких размеров.

## Список литературы:

1. Ithnin A.M., Noge H., Kadir H.A., Jazair W. An overview of utilizing water-in-diesel emulsion fuel in diesel engine and its potential research study // J. Energy Inst. 2014. V. 87. P. 273–288.
2. Moussa O., Tarlet D., Massoli P., Bellettre J. Parametric study of the micro-explosion occurrence of W/O emulsions // Int. J. Therm. Sci. 2018. V. 133. P. 90–97.
3. Antonov D.V., Volkov R.S., Fedorenko R.M., Strizhak P.A., Castanet G., Sazhin S.S. Temperature measurements in a string of three closely spaced droplets before the start of puffing/micro-explosion: Experimental results and modelling // Int. J. Heat Mass Transf. 2021. V. 181. 121837.
4. Voytkov I., Volkov R., Strizhak P. Reducing the flue gases temperature by individual droplets, aerosol, and large water batches // Exp. Therm. Fluid Sci. 2017. V. 88. P. 301–316.

*Работа поддержана Российским научным фондом  
(проект 21-71-10008,  
<https://rscf.ru/project/21-71-10008/>).*

УДК 62-665.9

## ОСОБЕННОСТИ СЛОЕВОГО ГОРЕНИЯ БИОТОПЛИВ В ПОТОКЕ ВОДОКИСЛОРОДНОГО ФЛЮИДА

Федяева О.Н., Востриков А.А., Артамонов Д.О., Шишкин А.В.

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

Ежегодно в Российской Федерации образуется 7–8 млн. тонн осадков сточных вод [1]. Исходя из данных [2, 3] легко оценить, что суточное производство свиного навоза и куриного помета (отходы III класса опасности) в РФ составляет соответственно 165.4 и 104.0 тыс. тонн. Обезвоженный осадок сточных вод (ОСВ) хранится на иловых полях, что из-за непрерывного увеличения его объема требует отчуждения все большего количества территорий. Применение ОСВ в качестве удобрения ограничивается высоким содержанием в нем тяжелых металлов [4], источником которых являются сточные воды промышленных предприятий. Большая часть свиного навоза (СН) и куриного помета (КП) хранится в отстойниках. В теплое время года эти отходы становятся средой для развития патогенных микроорганизмов и гельминтов, а в осенне-зимний период они разбавляются осадками, после чего поступают в поверхностные водоемы и грунтовые воды. Эмиссия токсичных веществ ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_3\text{SH}$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ , низших карбоновых кислот, фенола и его алкил-производных, индола и его алкил-производных) и аэрозольных частиц в атмосферу при хранении этих отходов приводит к загрязнению окружающей среды не только вблизи хранилищ, но и на прилегающих к ним территориях [5, 6].

Для утилизации таких отходов используют термические, биотермические и химические методы [7, 8]. Биотермическая переработка отходов происходит в течение длительного времени и нуждается в поддержании определенного температурного режима, что связано с дополнительными энергозатратами. Результаты [4, 7, 8] показывают, что сжигание и термическое разложение отходов позволяют снизить их объем. Однако эти процессы сопровождаются образованием и эмиссией в окружающую среду полициклических ароматических углеводородов, диоксинов, оксидов серы и азота, а также летучих токсичных элементов – As, Hg, Cd и Pb. Кроме того, для реализации термических процессов переработки отходов необходимо их предварительное высушивание (содержание воды в отходах варьруется от 50 до 90%).

Использование сверхкритической воды ( $T > 374^\circ\text{C}$ ,  $P > 22.1$  МПа), которая является наиболее дешевым и экологически чистым растворителем органических веществ и газов, выступает донором водорода и кислорода и каталитически действует на окисление топлив, может стать определяющим для решения проблемы утилизации обводненных токсичных отходов посредством их вовлечения в качестве возобновляемого топлива в энергетику [9]. В этом случае не требуется обезвоживания отходов, а использование замкнутых реакционных систем предотвращает эмиссию токсичных веществ в атмосферу. Кроме того, при окислении в сверхкритической воде (СКВ) основным продуктом превращения азотсодержащих соединений

является  $\text{N}_2$ , другие гетероатомы – галогены, сера и фосфор, входящие в состав органических веществ, переходят в минеральные кислоты, которые при помощи оснований можно выделить в виде солей из-за их малой растворимости в СКВ.

В докладе представлены результаты исследования горения ОСВ, СН и КП (пробы отобраны на территории Новосибирской области) при прокачке через их слой водокислородного флюида в режиме равномерного увеличения температуры. Эксперименты проведены с использованием трубчатого реактора, нагрев которого осуществлялся тремя независимыми омическими нагревателями. Исходя из временных зависимостей температуры стенки реактора, мощности омических нагревателей, степени выгорания углерода и выхода жидких и летучих продуктов установлено, что основная масса ОСВ окисляется при более низкой температуре, чем СН и КП. Это объясняется наличием в ОСВ оксидов переходных металлов, проявляющих каталитические свойства в процессах окисления. Анализ состава жидких продуктов показывает, что снижение атомного отношения Н/С в них при увеличении температуры связано как с преимущественным окислением алифатических веществ, так и с реакциями термоллиза. Рассмотрены механизмы превращения органических и неорганических компонентов отходов.

### Список литературы:

1. «Росводоканал» внедряет в регионах технологию утилизации осадков сточных вод, <https://www.interfax.ru/presscenter/812437>.
2. ЕМИСС государственная статистика. Поголовье скота и птицы в хозяйствах всех категорий, <https://fedstat.ru/indicator/31325>.
3. Girotto F., Cossi R. Animal waste: opportunities and challenges // *Sustain. Agric. Rev.* 2017. V. 22. P. 1–13.
4. Gao N., Kamran K., Quan C., Williams P.T. Thermochemical conversion of sewage sludge: A critical review // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2020. V. 79. P. 100843.
5. Liu D., Nyord T., Rong L., Feilberg A. Real-time quantification of emissions of volatile organic compounds from land spreading of pig slurry measured by PTR-MS and wind tunnels // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 639. P. 1079–1087.
6. Trabue S., Scoggin K., Tyndall J., Sauer T., Hernandez-Ramirez G., Pfeiffer R., Hatfield J. Odorous compounds sources and transport from a swine deep-pit finishing operation: A case study // *J. Environ. Manag.* 2019. V. 233. P. 12–23.
7. Liang Y., Xu D., Feng P., Hao B., Guo Y., Wang S. Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control // *J. Cleaner Production.* 2021. V. 295. P. 126456.
8. Li J., Li L., Suvama 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.
9. Федяева О.Н., Востриков А.А. Переработка обводненных токсичных отходов свиноводства и птицеводства в суб- и сверхкритической воде // *СКФ-ТП.* 2022. Т. 17. №2. (В печати).

*Исследование выполнено за счет гранта Российского  
научного фонда № 22-19-20003 и Правительства  
Новосибирской области № р-10.*



УДК 544.351.3

## ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЕ БЕФИНИЛА В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ БИНАРНОЙ СМЕСИ ПРОПАН/БУТАН

Хабриев И.Ш., Хайрутдинов В.Ф., Яруллин Л.Ю., Ахметзянов Т.Р., Салихов И.З., Сабирова С.В.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,  
420015, Россия, г. Казань, ул.К.Маркса, 68  
termi0@yandex.ru

Знание фазовых равновесий систем при высоком давлении важно для понимания процессов в промышленности и в природе. Это важно для проектирования и оптимизации процессов разделения и химических реакций под высоким давлением.

Поведение жидкостей при высоком давлении часто бывает сложным и трудным для прогнозирования. При высоких давлениях отклонения от идеального поведения становятся намного больше, чем при атмосферном или умеренном давлениях. Еще одним недостатком использования методов прогнозирования является то, что молекулы вещества при высоком давлении, особенно сверхкритическом флюидном состоянии, могут образовывать ассоциаты содержащие несколько функциональных групп. Таким образом, экспериментальное исследование часто является единственным достоверным методом определения поведения фаз при высоких давлениях. Для определения фазового равновесия при высоких давлениях используется много разных методов.

Существующие в настоящее время экспериментальные методы исследования могут быть классифицированы двумя путями. Первый относится к способу получения насыщенного раствора: статический (реализуется в замкнутой ячейке постоянного, либо переменного объема); динамический (реализуется в проточной системе); циркуляционный (предполагает многократное прокачивание одной порции газообразного растворителя, либо растворяемой жидкости). Второй путь классифицирует способы анализа состава растворов: аналитический (весовой, спектроскопический, хроматографический и др.) или синтетический (когда для исследования используется заранее подготовленная смесь с известным составом).

В работе представлено описание методики и оборудования для исследования фазового равновесия двойных систем. Для получения насыщенного раствора используется статическая ячейка постоянного объема с сапфировыми окнами, а для анализа фаз – гравиметрический способ. Приведены результаты экспериментального исследования бинарных систем «бифенил – пропан/бутан», осуществленного в интервале температур 403–443 К и диапазоне давлений 0.88–7 МПа.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из системы создания, регулирования и измерения давления, системы измерения и регулирования температуры, сосуда равновесия, системы вакуумирования, узла качения и аналитической части [1].

В рамках продолжающегося исследования равновесных свойств жидкой + газовой фаз бинарных и тройных смесей [2] были проведены измерения свойств фазового равновесия для бифенила в бинарной сверхкритической смеси (растворитель)

(0,527 пропан + 0,473 н-бутан). В качестве растворителя бинарной сверхкритической смеси использована готовая к применению смесь пропан + н-бутан с фиксированным составом 0,527 мольных долей пропана и 0,473 мольных долей н-бутана.

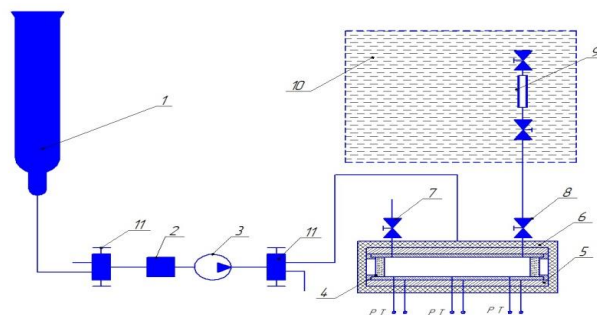


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования фазового равновесия бинарных систем: 1 – баллон; 2 – фильтр-осушитель; 3 – насос; 4 – оптическая ячейка высокого давления; 5 – медная рубашка; 6 – термоизоляция; 7 – вентиль для отбора верхней (газовой) фазы; 8 – вентиль для отбора нижней (жидкой) фазы; 9 – пробоотборник; 10 – термостатирующая ванна; 11 – вентиль.

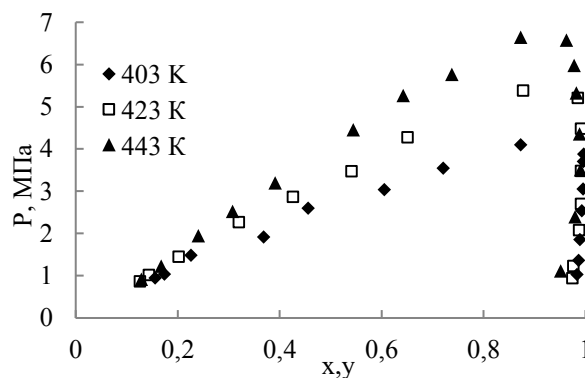


Рис. 2. Фазовое равновесие системы «бифенил – пропан/бутан»

### Список литературы:

1. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Gabitov F.R., Zaripov Z.I., Khabriev I.S., Akhmetzyanov T.R., Abdulagatov I.M. New Design of the High-Pressure Optical Cell for Vapor-Liquid Equilibrium Measurements. Supercritical Binary Mixture (Propane/n-Butane) + Acetophenone // Journal of Chemical and Engineering Data. 2020. V.65. I.7. P.3306–3317.
2. I.S. Khabriev, V.F. Khairutdinov, F.M. Gumerov, R.M. Khuzakhanov, R.M. Garipov, I.M. Abdulagatov, VLE properties and critical parameters of ternary mixture of CO<sub>2</sub>+toluene/dichloromethane involved in the SEDS precipitation process, J. Mol. Liquids 337 (2021) 116371.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 19-73-10029  
<https://rscf.ru/project/19-73-10029>.

УДК 536.6:669.45

КАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОГО СПЛАВА  $\text{Na}_{15}\text{Pb}_4$ 

Хайрулин А.Р.

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

Многие структурно-чувствительные свойства жидких сплавов щелочных металлов со свинцом демонстрируют нетипичное для жидкометаллических систем поведение. Связано это, как предполагается, с тем, что из-за большой разницы в электроотрицательности компонентов, в структуре данных расплавов происходит формирование ионных комплексов различных конфигураций, причем вид комплексов зависит от размера атома щелочного металла [1-3]. Так, например, на концентрационной зависимости относительного избыточного мольного объема жидкой системы Cs–Pb наблюдается минимум в районе 50 ат. % Pb, а объемный коэффициент теплового расширения имеет острый максимум при данной концентрации [4]. Жидкая система Na–Pb проявляет схожее поведение, но экстремумы на концентрационных зависимостях термодинамических и электрофизических свойств сдвигаются в область, близкую к 20 ат. % Pb, [5]. Некоторые сплавы систем A–Pb (A – щелочной металл) предлагаются в качестве теплоносителей для перспективных ядерных реакторов на быстрых нейтронах [6], а надежные экспериментальные данные по энтальпии и теплоемкости данных сплавов могут быть использованы при расчете параметров реактора. Согласно фазовой диаграмме системы Na–Pb [5], в твердом состоянии образуется соединение  $\text{Na}_{15}\text{Pb}_4$  (21,05 ат.% Pb – концентрация, близкая к положению экстремумов структурно-чувствительных свойств). Основной целью данной работы было получение надежных экспериментальных данных по энтальпии и теплоемкости жидкого сплава  $\text{Na}_{15}\text{Pb}_4$ .

Измерения энтальпии сплава проводились на массивном калориметре смешения с изотермической оболочкой [7]. Исходными компонентами являлись свинец марки С0 с чистотой 99,992 масс. % и натрий с чистотой 99,9 масс. %. Состав готовился весовым методом на электронных весах с погрешностью 2 мг. Содержание свинца в готовом образце составило 21,053 ат. %. Готовый образец помещался в ампулу из нержавеющей стали, которая герметизировалась электродуговой сваркой. Все процедуры по приготовлению образца проводились в перчаточном боксе в атмосфере аргона.

При проведении термического анализа сплава было обнаружено два тепловых эффекта. Первый соответствует кристаллизации образца, а второй (вероятно) – твердофазному переходу. Измеренная температура ликвидуса составила 644,5 К, а твердофазного перехода – 640,2 К.

Всего было получено 23 экспериментальных значения энтальпии в интервале температур 420–1075 К. Экспериментальные точки, их аппроксимация, а также рассчитанная теплоемкость представлены на рис. 1.

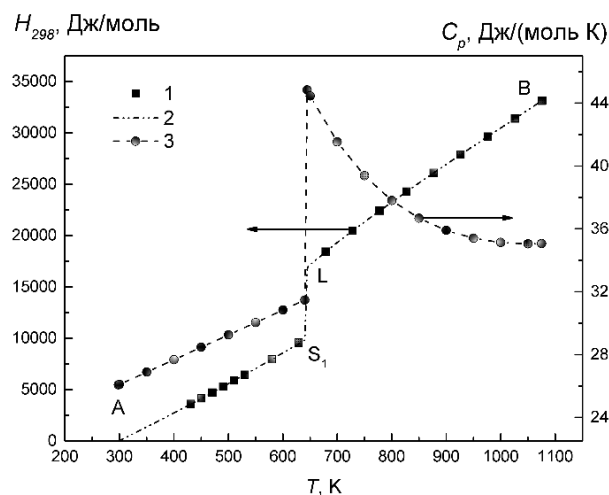


Рис. 1. Измеренные значения энтальпии (1), ее аппроксимация (2) и температурная зависимость теплоемкости (3) сплава  $\text{Na}_{15}\text{Pb}_4$  в твердом (ниже температуры твердофазного перехода,  $AS_1$ ) и жидком ( $LB$ ) состояниях.

В жидком состоянии наблюдается значительное падение теплоемкости с температурой, гораздо более выраженное, чем у расплава  $\text{Na}_{50}\text{Pb}_{50}$  [1]. Также существенно превышение теплоемкости расплава над теплоемкостью идеального раствора (достигает 51%). Оба этих факта подтверждают предположение [3] о том, что в жидкой системе натрий-свинец в основном образуются комплексы вида  $\text{Na}_4\text{Pb}$ .

## Список литературы:

1. Sabounji M. L. et al. Heat capacity of some liquid Zintl compounds: Equiatomic alkali-lead alloys //The Journal of chemical physics. – 1988. – Vol. 89. – No. 9. – P. 5869-5875
2. Гантмахер В. Ф. Химическая локализация //Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172. – №. 11. – С. 1283-1293
3. Geertsma W., Dijkstra J., Van der Lugt W. Electronic structure and charge-transfer-induced cluster formation in alkali-group-IV alloys //Journal of Physics F: Metal Physics. – 1984. – Vol. 14. – No. 8. – P. 1833.
4. Khairulin R. A., Abdullaev R. N., Stankus S. V. Volumetric properties of the liquid Cs-Pb system //Physics and Chemistry of Liquids. – 2021. – Vol. 59. – No. 1. – P. 162-168
5. Khairulin R. A., Stankus S. V., Abdullaev R. N. Density, thermal expansion and binary diffusion coefficients of sodium-lead melts //High Temperatures--High Pressures. – 2013. – Vol. 42. – No 6.
6. Субботин В. И. и др. Жидкометаллические теплоносители для ядерной энергетики //Атомная энергия. – 2002. – Т. 92. – №. 1. – С. 31.
7. Станкус С.В., Савченко И.В., Язук О.С. Высокотемпературный калориметр смешения для исследования веществ и материалов в твердом и жидком состояниях // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 4. – С. 150–156.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект № 121031800219-2).

УДК 621.577

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОБУСОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ФРЕОНАХ

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  
RMKhismatullin@kai.ru

Основной проблемой применения электрических грузовых автомобилей и электробусов на территории России является необходимость обогрева салона и поддержания температуры батарей в зимнее время года.

На данный момент в случае сильных морозов в некоторых электробусах используется дополнительный отопитель салона на дизельном топливе. В перспективе развития электробусов от него стоит отказаться и отопление салона должно осуществляться только за счет электрической мощности.

Оптимальным способом получения холодильной и тепловой энергии в климатических установках электробусов является использование парокompрессионных установок, где на один кВт потребленной электрической мощности можно получить 3-5 кВт тепловой энергии или холода. В тоже время эффективность парокompрессионных установок сильно зависит от диапазона температур в испарителе и конденсаторе. Так, в работе [1] экспериментально исследовано при работе электробуса Solaris Urbino e-bus в условиях городской эксплуатации и показано значительное потребление энергии климатической системой даже при температуре 5°C.

Для анализа термодинамической эффективности циклов обогрева и охлаждения рассмотрены фреоны используемые в климатических системах электробусов и модулях кондиционирования: R134A, R-290, R404a, R407C, R410a, R502, R507a, R-744, R1234YF.

В российских климатических условиях температурный диапазон составляет -40...+40°C, а температура в салоне и температура батарей должна поддерживаться в районе +20°C, принимая температурный напор для испарителя в 5°C, а конденсатора в 10°C, получаем максимальные температуры фреона в испарителе -45°C, а, с учетом температурного напора температура в конденсаторе +50°C. Для поддержания температуры салона, аккумуляторов и электродвигателей +20°C.

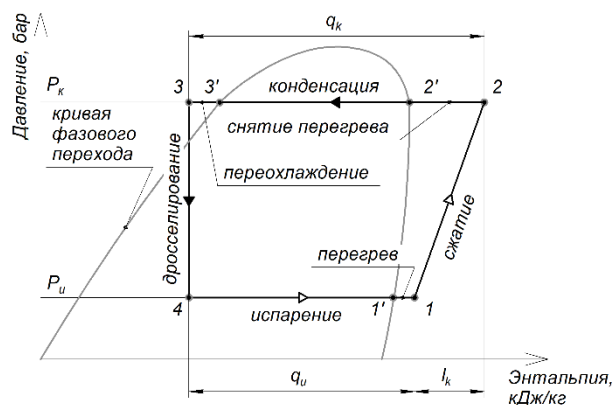


Рис. 1. Цикл холодильной машины.

Исследование проведено диаграммным методом (рис. 1) в соответствии с указанными температурами.

Анализ термодинамической эффективности климатической установки в режиме охлаждения показывает, что наиболее эффективными фреонами для летних условий эксплуатации являются R134, R290 и R600a, холодильный коэффициент которых составляет 4,1, 4,1 и 4,2 соответственно. Остальные фреоны, кроме R744, имеют хороший холодильный коэффициент более трех. Самую низкую эффективность показал фреон R744 (CO<sub>2</sub>), который показал холодильный коэффициент 1,6, что связано с большими затратами на сжатие при работе в транскритическом цикле. Следует отметить, что работа на транскритическом цикле связана с большим давлением 120 атм. В докритических циклах наибольшее давление показывает фреон R410a, давление конденсации которого составляет 30 атм. Следует отметить, что низкую степень повышения давления в компрессоре для всех фреонов, которая не превышает 5.

Работа климатической установки в режиме обогрева показывает следующие результаты: наибольшую эффективность имеют фреоны R134a и R600a, коэффициент преобразования которых в зимних условиях составляет 2, 3, но степень повышения давления при этом у фреона R134a составляет 19,4, а у фреона R600a – 18,3, что практически недостижимо для компрессоров холодильных установок, а абсолютные давления конденсации небольшие и не превышают 8 атм. Основным ограничивающим условием работы климатической установки в зимнее время является степень повышения давления. Самую низкую степень повышения давления показывает R744 – 8,3. Следующим фреоном с низкой степенью сжатия является R290, у которого она составляет – 12,5.

Наиболее подходящим фреоном для всесезонной работы климатической установки в российских условиях является R290, летом холодильный коэффициент составляет – 4,1, а давление конденсации не превышает 20 атм., зимой коэффициент преобразования составляет 2,1.

### Список литературы:

1. Cigarini, F.; Fay, T.-A.; Artemenko, N.; Göhlich, D. Modeling and Experimental Investigation of Thermal Comfort and Energy Consumption in a Battery Electric Bus // World Electr. Veh. J. 2021, 12, 7.

Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 22-19-00373,  
<https://rscf.ru/project/22-19-00373>.

УДК 620.92

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ЮГЕ СИБИРИ

Хорева В.А., Елистратов С.Л.

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

Юг Сибири является перспективным регионом для использования солнечной энергии, так как число часов солнечного сияния здесь составляет 2100–2600 ч/год [1, 2]. Для обоснования эффективности использования солнечной энергии в данном регионе в работе рассчитана максимальная годовая экономия условного и первичного топлива, максимальные значения объема сухих продуктов сгорания, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> и золы, которые не выбрасываются в год при использовании 1 м<sup>2</sup> эффективной поверхности солнечного коллектора, а так же, снижение углеродного следа. Расчет произведен для используемых на юге Сибири углей и газа. Юг Сибири находится в зоне холодного климата, что требует значительных затрат на горячее водоснабжение и отопление жилых и производственных помещений. С увеличением роста цен на энергоносители и в условиях холодного климата Западной Сибири проблема энергосбережения является весьма актуальной. Под югом Сибири подразумеваются территории Новосибирской области, республики Алтай и Алтайского края.

В Таблице 1 приведено максимальное количество условного и реального топлива, которое экономит потребитель, например, владелец частного дома за год, если использует солнечные водонагревательные коллекторы. Данные приведены на 1 м<sup>2</sup> эффективной площади солнечного коллектора.

Таблица 1. Максимальная годовая экономия ресурсов на юге Сибири на 1 м<sup>2</sup> солнечного водонагревающего коллектора.

Энергетический ресурс	Экономия ресурса
Условное топливо	265 кг
Кузнецкий уголь марки Д	338 кг
Кузнецкий уголь марки Г	297 кг
Кузнецкий уголь марки 1СС	326 кг
Кузнецкий уголь марки 2СС	316 кг
Кузнецкий уголь марки Ж	370 кг
Экибастузский уголь СС	463 кг
Беловский уголь, антрацит	286 кг
Листвянские шахты, антрацит	223 кг
Нерюнгринский газ	175 м <sup>3</sup>
Тюменский газ	217 м <sup>3</sup>
Уренгойский газ	220 м <sup>3</sup>
Ямбургский газ	219 м <sup>3</sup>

В Таблице 2 приведена экологическая эффективность использования солнечных коллекторов на юге Сибири. В таблице указано максимально возможное сокращение объема сухих продуктов сгорания (V<sub>0</sub>) и золы на 1 м<sup>2</sup> эффективной поверхности солнечного коллектора.

Таблица 2. Максимально возможное сокращение выбросов на 1 м<sup>2</sup> солнечного водонагревательного коллектора.

Тип топлива	V <sub>0</sub> , м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup>	Зола, кг/м <sup>2</sup>
Кузнецкий уголь марки Д	1997,399	44,84
Кузнецкий уголь марки Г	1987,243	32,64
Кузнецкий уголь марки 1СС	1913,84	42,96
Кузнецкий уголь марки 2СС	1997,435	57,403
Кузнецкий уголь марки Ж	1980,572	113,68
Экибастузский уголь СС	2000,88	176,35
Беловский уголь, антрацит	2480,055	1,71
Листвянские шахты, антрацит	1951,73	1,115
Нерюнгринский газ	1469,07	-
Тюменский газ	1849,69	-
Уренгойский газ	1871,54	-
Ямбургский газ	1867,82	-

В Таблице 3 приведены максимальные значения снижения углеродного следа на юге Сибири на 1 м<sup>2</sup> эффективной поверхности солнечного водонагревательного коллектора. Данные по углеродному следу от добычи газ и угля шахтным и открытым способом взяты из [3], [4], [5]. Таблица 3 показывает снижение экологических издержек, связанных с добычей, переработкой и транспортировкой ископаемого топлива.

Таблица 3. Максимальные значения снижения углеродного следа на юге Сибири на 1 м<sup>2</sup> эффективной поверхности солнечного водонагревательного коллектора.

Энергетический ресурс	Углеродный след, кг
Кузнецкий уголь марки Д	35,33
Кузнецкий уголь марки Г	30,85
Кузнецкий уголь марки 1СС	33,85
Кузнецкий уголь марки 2СС	32,81
Кузнецкий уголь марки Ж	38,51
Экибастузский уголь СС	48,14
Беловский уголь, антрацит	29,69
Листвянские шахты, антрацит	23,19
Нерюнгринский газ	17,93
Тюменский газ	22,52
Уренгойский газ	22,86
Ямбургский газ	22,82

### Список литературы:

1. СП 131.13330.2020. Строительная климатология.
2. Книга о солнце. Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения. Viessmann 2010. 194 с.
3. Отчет АО «Институт ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» 2020 год.
4. Отчет Black Coal Corp. Comparative Carbon Footprint Met Coke vs. Anthracite 2020 год.
5. Экологический отчет «СибАнтрацит» 2021 год.

УДК 621.039.58

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ УСЛОВИЙ И РЕЖИМОВ ИСТЕЧЕНИЯ ВО ВСТАВКЕ  
ОГРАНИЧИТЕЛЬНОЙ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ВВЭР-1000**

**Хоронжевский Д.А., Басов Д.К., Цветков К.В., Щеколдин В.В., Пантюшин С.И., Литышев А.В.**

АО ОКБ «Гидропресс»,

142103, Россия, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, 21

При проектировании и эксплуатации энергоблоков атомных станций необходимо проводить анализы безопасности в соответствии с требованиями федеральных норм и правил (НП-001-15 и НП-006-16). В соответствии с НП-006-16, к группе исходных событий с уменьшением массы теплоносителя в первом контуре относятся разрывы трубопроводов присоединенных к первому контуру, пересекающие гермооболочку. Для ограничения выбросов за пределы гермооболочки и снижения радиационного воздействия на окружающую среду, при разрывах в линиях, выходящих за пределы гермооболочки, применяются ограничительные вставки.

Конструктивно ограничительная вставка имеет сужающийся участок (конфузор), прямой участок с узким сечением, расширяющийся участок (диффузор). Схема ограничительной вставки представлена на рис. 1.

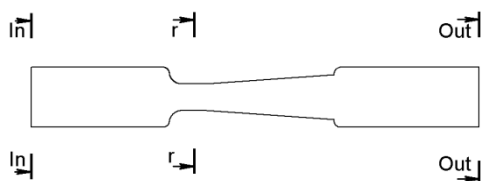


Рис. 1. Схема [1].

Физика протекания процесса в ограничительной вставке следующая. При отсутствии перепада давления между входным и выходным сечением течение жидкости отсутствует. При дальнейшем увеличении перепада давления увеличивается расход и уменьшается давление в узком сечении (на рис. 1 сечение  $r$ ). При определенном перепаде давления в узком сечении давление достигнет давления насыщения, что приведёт к образованию пара и резкому уменьшению скорости звука. Дальнейшее увеличение перепада давления не приводит к увеличению расхода, так как скорость среды в узком сечении не может превышать скорость звука.

По результатам аналитического анализа было получено значение давления в выходном сечении в 14,66 МПа, при котором происходит закипание потока. По результатам проведенных исследований получена зависимость расхода от давления в запирающем сечении для двухфазного потока (рисунок 2), а также зависимость расхода от разницы давлений между входным и выходным сечением для однофазного потока (рис. 3).

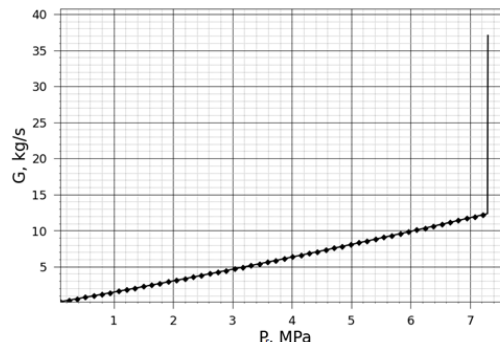


Рис. 2. Зависимость расхода от давления в запирающем сечении (сечение  $r$ ).

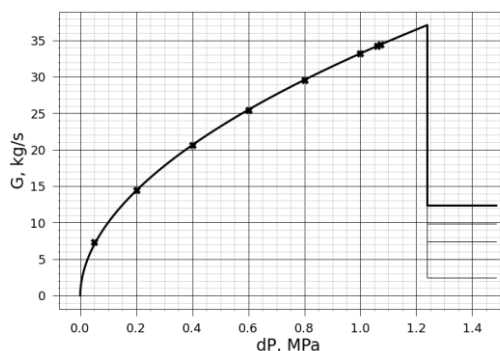


Рис. 3. Зависимость расхода от разницы давлений между входным и выходным сечением

При температуре теплоносителя 290°C, неизменном давлении во входном сечении 15,9 МПа и давлении в выходном сечении 14,66 МПа расход через ограничительную вставку не может превышать 37 кг/с. При этом данное значение трудно реализуемо с учетом геометрии реального трубопровода системы продувки (наличие теплообменников, арматур, клапанов), наличие которых дополнительно увеличивает перепад давления за счет местных сопротивлений. В случае закипания потока расход не превышает 13 кг/с.

Основываясь на результатах проведенных исследований, следует отметить, что при проведении анализов безопасности, при условиях характерных для разрывов линий выходящих за пределы гермооболочки, целесообразно использовать значение расхода через ограничительную вставку равного 13 кг/с, так как будет наблюдаться постоянное снижение давления, приводящее к кипению теплоносителя и закипанию потока.

Список литературы:

1. [http://www.vpolesye.ru/archiv\\_novosti\\_i\\_sobytiya/novosti\\_i\\_sobytiya\\_2015\\_goda/novosti\\_noyabr\\_2015/](http://www.vpolesye.ru/archiv_novosti_i_sobytiya/novosti_i_sobytiya_2015_goda/novosti_noyabr_2015/)

УДК 532.5

## ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ И ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В НАНОЖИДКОСТИ ВДОЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОЙ РАСТЯГИВАЮЩЕЙСЯ ПЛАСТИНЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ ВНУТРИ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ, ПРИ НАЛИЧИИ ОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Хуссейн Музамиль<sup>1,2</sup>, Шеремет М.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Университет COMSATS, 44000 Пакистан, Исламабад

<sup>2</sup> Томский государственный университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Поиск эффективных способов повышения производительности энергетических систем за счет увеличения скорости теплопередачи происходит постоянно. Включение твердых наночастиц в обычные теплоносители (вода, масло), что приводит к появлению наножидкостей, является одним из подходов, используемых для улучшения тепловых характеристик энергетических систем [1]. С другой стороны, применение пористых сред в теплообменниках является еще одним методом интенсификации теплообмена за счет роста площади контактной поверхности [2].

Исследования, посвященные изучению течений наножидкостей и теплопереноса в пористых средах, встречаются очень часто из-за широкого спектра приложений, связанных, например, с производством теплоизоляторов, функционированием геотермальных систем, распространением загрязняющих веществ в грунтовых водах, разработкой солнечных коллекторов, изоляцией зданий [1, 2].

Целью данной работы является математическое моделирование конвективно-радиационного теплопереноса внутри наножидкости вблизи вертикальной растягивающейся пластины, расположенной в пористой среде, при наличии однородного магнитного поля (рисунок 1).

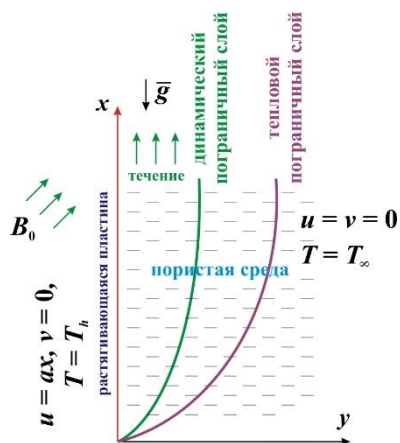


Рис. 1. Физическая постановка задачи.

Рассматривается двумерное, стационарное, ламинарное течение наножидкости вдоль вертикальной растягивающейся поверхности, погруженной в пористую среду (рис. 1). Для описания транспортных процессов внутри пористой среды используется модель Бринкмана – Форхгеймера. Для моделирования теплопереноса в наножидкости используется однофазная модель с эффективными параметрами. В наножидкости на водной основе в качестве наночастиц рассматриваются одностенные и многостенные углеродные

нанотрубки. На течение оказывает влияние однородное магнитное поле, ориентированное под некоторым углом к горизонту. Течение обусловлено не только перепадом температур и влиянием магнитного поля, но и линейным растяжением вертикальной поверхности. Предполагается, что температура на поверхности выше температуры окружающей среды. Также считается, что базовая жидкость (вода) и наночастицы находятся в условиях теплового равновесия. Определяющие уравнения Обербека – Буссинеска записываются в приближении пограничного слоя при наличии силы Лоренца и теплового излучения, сформулированного в приближении Росселанда.

При изучении гидродинамики и теплообмена в приближении пограничного слоя возможно применение методов переменной подобия и локальной неавтономности. Решение задачи на основе метода переменной подобия проводится достаточно просто. Однако такой подход неэффективен для некоторых физических задач.

В данном случае метод переменной подобия использовать нельзя, поэтому применяется метод локальной неавтономности. Многие исследователи [3, 4] использовали такой подход для решения сложных задач гидродинамики и теплопереноса. Вычислительный код был реализован в пакете MATLAB.

В результате были проведены исследования в широком диапазоне изменения определяющих параметров, отражающих влияние температурного напора, магнитного поля, пористой среды и растяжения вертикальной поверхности.

### Список литературы:

1. Ajeeb W., Murshed S.M.S. Nanofluids in compact heat exchangers for thermal applications: A State-of-the-art review // Thermal Science and Engineering Progress 2022. Vol. 30. 101276.
2. Xu H.J., Xing Z.B., Wang F.Q., Cheng Z.M. Review on heat conduction, heat convection, thermal radiation and phase change heat transfer of nanofluids in porous media: Fundamentals and applications // Chemical Engineering Science 2019. Vol. 195. Pp. 462–483.
3. Farooq U., Hussain M., Ijaz M.A., Khan W.A., Farooq F.B. Impact of non-similar modeling on Darcy-Forchheimer-Brinkman model for forced convection of Casson nanofluid in non-Darcy porous media // International Communications in Heat and Mass Transfer 2021. Vol. 125. 105312.
4. Cui J., Razaq R., Farooq U., Khan W.A., Farooq F.B., Muhammad T. Impact of non-similar modeling for forced convection analysis of nanofluid flow over stretching sheet with chemical reaction and heat generation // Alexandria Engineering Journal 2022. Vol. 61(6). Pp. 4253–4261.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

УДК 621.9

**ПРОТИВОТОЧНОЕ ТЕЧЕНИЕ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ГАЗА – УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ЭВОЛЮЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ**

**Цвелодуб О.Ю.**

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

Часто при рассмотрении совместного течения пленки жидкости, стекающей по вертикальной поверхности и турбулентного потока газа задачу разделяют на два этапа. На первом рассматривается течение газа над искривленной поверхностью раздела, которую считают жесткой и неподвижной. Здесь вычисляются возмущения напряжений газа на поверхности раздела.

Затем решается задача о волновых режимах в жидкой пленке, находящейся в известном поле возмущений трения, вызванных искривлением этой границы. вносимыми этой поверхностью.

В настоящей работе такой подход использован для задачи о течении вертикально стекающей пленки, обдуваемой противоточным потоком газа. В случае малых расходов жидкости ( $Re \sim 1$ ) данная задача сводится к рассмотрению одного эволюционного уравнения на толщину пленки Оно справедливо в случае малых расходов жидкости для возмущений малой, но конечной амплитуды. В системе отсчета, где ось  $x$  направлена по течению газа, т.е. вверх, это уравнение имеет вид [1]:

$$h_t - \frac{Re}{Fr} h^2 h_x + Re \tau_0 h h_x + \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{3} \varepsilon Re We^3 h_{xx} + \frac{2}{15} \frac{Re^3}{Fr^2} h^3 h_x (h - \tau_0 Fr) + \frac{1}{2} Re h^2 \tau_0 \int \hat{h}_k k \tau(k) e^{ikx} dk \right) = 0 \quad (1)$$

Здесь  $Re = \rho h_0 u_0 / \mu$  – число Рейнольдса,  $We = \sigma / \rho l_0 u_0^2$  – число Вебера,  $Fr = u_0^2 / gh_0$  – число Фруда,  $\varepsilon = h_0 / l_0$  – отношение характерной толщины пленки  $h_0$  к характерному продольному размеру возмущений –  $l_0$ . В интегральном слагаемом в уравнении (1) присутствуют Фурье-компоненты касательных напряжений газа на границе раздела, обусловленные криволинейностью этой границы –  $\tau(k) = \tau_r(k) + i\tau_{im}(k)$ , и Фурье-компоненты разложения формы поверхности пленки \*\*.

Ограничиваясь рассмотрением возмущений малой, но конечной амплитуды и вводя быстрое и медленное времена, с помощью преобразования

$$h = 1 + \varepsilon h_1, \quad t_0 = t, \quad t_1 = \varepsilon t$$

из уравнения (1) получаем:

$$\frac{\partial h_1}{\partial t_0} - \frac{Re}{Fr} (1 - Fr \tau_0) \frac{\partial h_1}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial t_1} - \frac{Re}{Fr} (2 - Fr \tau_0) h_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{W Re \varepsilon}{3} \frac{\partial^4 h_1}{\partial x^4} + \frac{2}{15} \frac{Re^3}{Fr^2} \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} (1 - \tau_0 Fr) + \frac{1}{2} Re \tau_0 \int i \hat{h}_k k^2 \tau(k) e^{ikx} dk = 0 \quad (3)$$

Из уравнения (2) следует, что в первом приближении (на быстрых временах) возмущения малой, но конечной амплитуды, распространяются с характерной постоянной скоростью:

$$c_0 = -\frac{Re}{Fr} (1 - Fr \tau_0)$$

В этом приближении движение происходит без изменения начальной формы возмущений.

Уравнение (3) описывает нелинейную эволюцию возмущений на больших временах.

В зависимости от того в каком диапазоне величин лежит значение произведения числа Фруда и безразмерного напряжения трения на невозмущенной границе раздела ( $Fr \tau_0$ ) задача сводится к различным моделям. После соответствующей замены уравнение (3) может быть представлено в следующем формальном виде:

$$\frac{\partial H}{\partial t} m 2H \frac{\partial H}{\partial x} \pm (1; 0) \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^4 H}{\partial x^4} + B \int_{-\infty}^{\infty} ik^2 \tau(k) \hat{H}(k, t) e^{ikx} dk = 0 \quad (4)$$

Конкретные знаки ( $\pm, m$ ) и коэффициенты (1;0) зависят от того, в каком именно диапазоне величин лежит значение произведения числа Фруда и безразмерного напряжения трения на невозмущенной границе раздела. Фактически (4) представляет собой набор нескольких разных моделей.

В работе обсуждается, каким именно газожидкостным течениям эти модели соответствуют. Численно построены несколько характерных решений для этих моделей.

Список литературы:

1. Tsvelodub O.Yu. Modeling wave modes for a countercurrent flow of film and turbulent gas // J. Phys.: Conf. Ser. 1675 (2020) 012041.

## ВЛИЯНИЕ ГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ В КАМЕРЕ-РЕАКТОРЕ НА ПРОДУКТ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА В СИСТЕМЕ Fe-O

Циммерман А.И.<sup>1,2</sup>, Шаненков И.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Томский политехнический университет,  
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

<sup>2</sup> Тюменский государственный университет,  
625003, Россия, Тюмень, ул. Володарского, 6

В последние годы большой научный интерес направлен на исследование магнитных материалов, в частности оксидов железа различных структурных модификаций и фазового состава [1]. Оксид железа (IV), минералогически известный как магнетит  $Fe_3O_4$ , является наиболее изученным и известным магнитным материалом, поэтому интерес к нему постоянно повышается благодаря его возможным областям применения. Среди магнитомягких ферритов  $Fe_3O_4$  наиболее подходит для медицинских применений за счет нетоксичности при низких дозах, биосовместимости и биоразлагаемости. Кроме того магнетит может применяться в устройствах спинтроники, оптических устройствах, биосенсорах и др. [2, 3].

На сегодняшний день разработано множество различных методов получения магнетита, например, высокоэнергетический механосинтез, золь-гель метод, химическое соосаждение, автоматическое сгорание и др. [3]. Основными недостатками этих методов являются время проведения химических реакций (от суток до нескольких недель), использование токсичных химикатов и дороговизна процесса. Одним из путей преодоления указанных недостатков является получение магнетита плазмодинамическим методом, который характеризуется быстройдействием (время синтеза составляет менее 1 мс), низкими удельными энергозатратами (10 кВт·ч на 1 кг материала) и использованием безопасных прекурсоров. В ранее опубликованных работах, например [4], была показана возможность получения магнетита и его использования в качестве радиопоглощающего материала для абсорбции электромагнитного излучения. Тем не менее, чистота выхода магнетита согласно представленным данным не превышала 74 мас. %, что, по всей видимости, обусловлено особенностями протекающих процессов в смеси газов  $Ar/O_2$ , которая использовалась в качестве рабочей среды для плазмохимических реакций.

В представленной работе показаны результаты исследований по оценке возможности повышения содержания магнетита в продукте, полученном плазмодинамическим методом, за счет реализации синтеза с использованием другого инертного газа (гелия) и условно инертного газа по отношению к компонентам системы «Fe-O» (азота).

Система плазмодинамического синтеза для получения порошкообразных продуктов системы «железо-кислород» была подробно описана ранее [4]. Основным элементом системы является коаксиальный магнитоплазменный ускоритель (КМПУ) со стальными электродами, который герметично монтируется в рабочую камеру-реактор, в которой протекают основные плазмохимические реакции. Камера-реактор

представляет собой цилиндр с крышками из нержавеющей стали объемом 0,034 м<sup>3</sup>. Перед проведением эксперимента при помощи форвакуумного насоса вакуумируют камеру, после чего заполняют газообразной смесью из инертного газа (азота, гелия или аргона) с добавлением кислорода суммарным давлением 1 атм. Соотношение парциальных давлений инертного газа и кислорода  $\omega(O_2)$  во всех экспериментах составляло 90%/10% соответственно. В качестве марки электродов ускорителя была выбрана сталь «Ст20» из-за низкого содержания примесных элементов.

Исходные энергетические параметры накопителя (зарядное напряжение  $U_{зар}$ , емкость  $C_{зар}$  и накапливаемая энергия  $W_C$  конденсаторных батарей) в рамках данной серии экспериментов оставались неизменными и были выбраны такими же, как и в ранее проведенных исследованиях [4].

Обработка и анализ дифрактограмм для оценки фазового состава синтезированных материалов производились в программной среде Powder Cell 2.4 с использованием базы данных PDF4. Структура порошка исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (микроскоп Hitachi TM3000).

В работе показана возможность получения ультрадисперсных частиц магнетита методом плазмодинамического синтеза и изменения фазового состава продуктов за счет варьирования типа инертного газа (аргон, азот и гелий) в смеси с кислородом. Установлено, что использование азота и гелия вместо аргона позволяет увеличить содержание магнетита с 73 мас. % до 85 мас. %. Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что условия газовой среды оказывают влияние на структуру получаемых частиц магнетита. Таким образом, методом плазмодинамического синтеза возможно не только управлять фазовым составом конечных продуктов, но и изменять структуру частиц магнетита.

### Список литературы:

1. Tuček J. et al. Zeta-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – A new stable polymorph in iron (III) oxide family // Scientific reports. 2015. Т. 5. С. 15091.
2. Li J. et al. Three-dimensional graphene supported Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> coated by polypyrrole toward enhanced stability and microwave absorbing properties // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Т. 9. №. 1. С. 762–772.
3. Chen T. et al. Boron removal and reclamation by magnetic magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticle: An adsorption and isotopic separation study // Separation and Purification Technology. 2020. Т. 231. С. 115930.
4. Shanenkov I. et al. Magnetite hollow microspheres with a broad absorption bandwidth of 11.9 GHz: toward promising lightweight electromagnetic microwave absorption // Physical Chemistry Chemical Physics. 2017. Т. 19. №. 30. С. 19975–19983.

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Госзадания № FEWZ-2021-0014.*



УДК 536.248.2

## СТАБИЛЬНОЕ ТЕЧЕНИЕ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ УРОВНЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Чеведа В.В.<sup>1,2</sup>, Кабов О.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Со временем производительность кремниевых технологий становится менее затратной, их становится больше, а также все более органично интегрируются в нашу повседневную жизнь. В результате с увеличением плотности транзисторов процессоров увеличивается тепловыделение от процессоров. Прогнозы дорожной карты для категории высокопроизводительных чипов предполагают, что максимальная рассеиваемая мощность чипа превысит 500 Вт [1]. Система охлаждения на основе пленочного течения жидкости является перспективным решением для наземного и космического применения. Механизм отвода тепла с помощью эффекта охлаждения пленкой жидкости для космических применений был предложен в [2]. В условиях невесомости устойчивое пленочное течение жидкости пока не исследовано.

Экспериментальная установка специально разработана для параболических полетов. Установка должна удовлетворять техническим требованиям безопасности, установленным организацией ESA. Подробнее см. [3]. Специальный экспериментальный участок используется для исследования пленки жидкости при переменном значении ускорения. Состоит из: 1) текстолитовой пластины, 2) подложки из нержавеющей стали, 4) сопла для жидкой пленки, 5) текстолитового каркаса и 6) текстолитовой крышки с оптическим окном, см. рис. 1. Основным элементом испытательной части является плоская пластина из нержавеющей стали. Несколько калиброванных термисторов использовались для управления температурой в нескольких ключевых точках. Пластина закреплена на текстолитовом основании вместе с текстолитовым каркасом. Рамка с пластиной закрыта прозрачным окном, образующим прямоугольный миниканал размерами 67 x 30 x 1,4 мм<sup>3</sup> (длина, ширина и глубина соответственно).

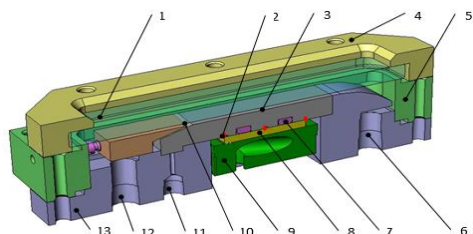


Рисунок 1. Схема рабочего участка в разрезе:  
1 – прозрачная крышка, 2 – термосенсоры, 3 – пластина из нержавеющей стали, 4 – текстолитовая крышка, 5 – текстолитовая рамка, 6 – выход двух-фазной смеси, 7 – термopредохранители, 8 – элемент Пельтье, 9 – водяной теплообменник, 10 – жидкостное сопло, 11 – вход жидкости, 12 – вход газа, 13 – текстолитовая пластина.

Термоэлектрический модуль (элементы Пельтье) используется для стабилизации температуры подложки. Жидкость подается в буферную камеру испытательной ячейки. Пленка жидкости, образуемая в сопле, движется по каналу под действием газового потока. Газожидкостная смесь откачивается в атмосферу вакуумным насосом.

В некоторых случаях расширение ручейка происходит настолько сильно, что его границы касаются стенок канала и таким образом течение переходит в пленочное. Течение пленки жидкости при различных расходах газа и жидкости и значениях ускорения свободного падения представлено на рис. 2.

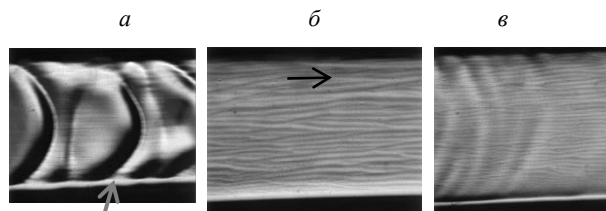


Рис. 2. Устойчивое течение плёнки жидкости (FC-72) при разном ускорении свободного падения:  
а – невесомость (0.01g), б – нормальное ускорение свободного падения (1.0g), в – повышенное (1.8g);  
 $Re_l=57.2$ ,  $Re_g=370$ ,  $T_n=10^\circ\text{C}$ .

В любом случае легче создать пленку жидкости, увеличивая расход жидкости. Сложнее создать жидкую пленку при невесомости. Поверхностное натяжение стало доминирующей силой, стремящейся минимизировать поверхность. С точки зрения энергии в условиях невесомости ручейки более эффективны, чем пленка. Поэтому пороговые расходы жидкости, необходимые для обеспечения перехода от ручейка к пленке при невесомости, в несколько раз больше, чем при нормальном и повышенном ускорении свободного падения.

### Список литературы:

1. Bar-Cohen A. and Rahim E., Modeling and prediction of two-phase refrigerant flow regimes and heat transfer characteristics in microgap channels, in: Proceedings of the 5th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels ICNMM2007, 2007.
2. Kim H., Bankoff S.G., Miksis M.J., The cylindrical electrostatic liquid film radiator for heat rejection in space. J. Heat Transfer 1994, 116, pp. 986-992.
3. Cheverda, V., Glushchuk, A., Queeckers, P., Chikov, S. B., Kabov, O.A., Liquid rivulets moved by shear stress of gas flow at altered levels of gravity, Microgravity sci. technol. 2013, 25 ( 1), pp. 73-81.

УДК 620.9, 502.171

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО И ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Шадрин Е.Ю., Садкин И.С., Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Копьев Е.П.

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

Сжигание является наиболее широко распространенным способом утилизации горючих отходов. Основной целью активно развивающейся концепции Waste-to-Energy в условиях массового накопления промышленных отходов является производство энергии путем утилизации отходов и снижение негативного воздействия на окружающую среду [1, 2]. Привлекательность такого подхода обусловлена низкой стоимостью энергоносителей, которые могут быть заменой качественным видам топлива для различных технологических процессов.

Идея совместного сжигания жидких и твердых углеродосодержащих отходов связана с тем, что низкореакционное угольное топливо при одиночном сжигании плохо воспламеняется, нестабильно горит, требует «подсветки» дорогостоящими газом или мазутом. Кроме этого, сжигание распыленного угольного топлива в горелках малой мощности не оказывается эффективным по причине длительного времени выгорания частиц топлива и более низких температур. Совместное сжигание твердого и жидкого топлива 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.

В работе процесс совместного сжигания жидкого и пылеугольного топлива (ПУТ) исследуется с использованием разработанного горелочного устройства, схема которого представлена на рис. 1. Основными особенностями исследуемого устройства являются: подача перегретого водяного пара в область горения для распыления жидкого топлива повышения экологических характеристик сжигания; тангенциальная подача угольной пыли в нижней части камеры сгорания вместе с первичным воздухом. Благодаря чему обеспечивается высокая полнота сгорания топлива и низкий уровень вредных выбросов в горелочном устройстве малой мощности.

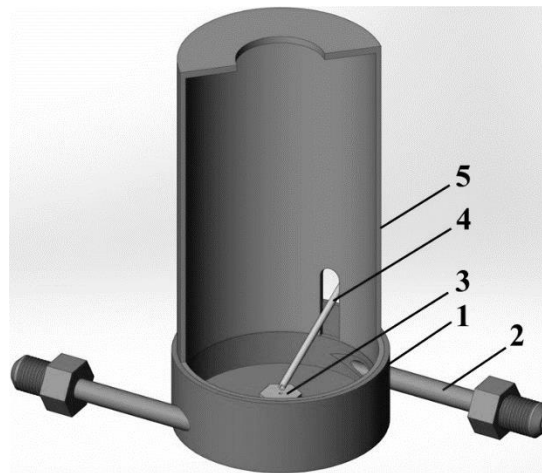


Рис. 1. Схема горелочного устройства для совместного сжигания жидкого и пылеугольного топлива:  
1 – основание горелочного устройства; 2 – тангенциальная подача ПУТ; 3 – паровая форсунка; 4 – подача жидкого топлива; 5 – камера сгорания.

С использованием экспериментального стенда [3] проведены измерения полной теплоты сгорания топлива и газовый анализ конечных продуктов сгорания. Показана эффективность исследуемого горелочного устройства малой мощности для совместного сжигания жидкого и угольного 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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.005>.
3. 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. No. 123849. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123849>.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00443)*

УДК 536.46

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Шаклеин А.А.<sup>1</sup>, Коробейничев О.П.<sup>2</sup>, Карпов А.И.<sup>1</sup>,  
Трубачев С.А.<sup>2</sup>, Шмаков А.Г.<sup>2</sup>, Палецкий А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН  
426067, Россия, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

<sup>2</sup> Институт химической кинетики и горения СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 3  
shaklein@udman.ru

Изучение закономерностей горения твердых материалов позволяет развивать теоретические основы, расширять знания о происходящих процессах и их взаимодействиях друг с другом, повышать предсказательные возможности теорий и численных моделей, практическое применение которых в частности ориентировано на решение задач пожаробезопасности. Распространение пламени по поверхности горючего материала представляет удобный инструмент для исследований горения твердых материалов, поскольку все взаимодействие различных физико-химических процессов в рассматриваемой гетерогенной системе сводится к уникальному параметру – скорости распространения пламени.

В работе проводится численное моделирование распространения пламени по поверхности различных полимерных материалов (полиметилметакрилат, полиоксиметилен, стеклопластик), как чистых, так с ингибиторами на основе фосфора и графена.

Математическая модель, описывающая ламинарное течение многокомпонентного реагирующего газа, газофазное горение, теплопроводность и пиролиз твердого горючего материала, сформулирована в сопряженной постановке для разрешения тепломассообмена между газовой фазой и горючим материалом [1]. Газофазное горение описывается одной или двумя глобальными реакциями. Скорость газификации твердого полимера на поверхности горения определяется линейным интегралом от объемной скорости пиролиза. Граничные условия общеприняты [1].

Исходные дифференциальные уравнения математической модели интегрируются методом конечных объемов. Дискретизация уравнений осуществляется на совмещенной расчетной сетке. Вводится итерационная процедура на каждом временном шаге для обеспечения согласованности всех расчетных параметров.

Расчет полей скорости и давления осуществляется на основе процедуры PISO. Конвективные слагаемые аппроксимируются противоточной схемой первого порядка, диффузионные – линейной схемой второго порядка. Вычислительный алгоритм реализован в программном комплексе OpenFOAM.

Рассмотрены конфигурации распространения пламени вниз по вертикальной поверхности и по горизонтальной поверхности полимерных материалов. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными как по макроскопическим характеристикам (скорость распространения пламени, ширина зоны пиролиза, массовая скорость горения), так и по локальным параметрам (температура газа и твердого материала, концентрации основных компонентов). Получено хорошее согласование между расчетными и измеренными данными, что показывает адекватность сформулированной математической модели и ее применимость к теоретическому описанию распространения пламени по поверхности полимерных материалов.

### Список литературы:

1. Karpov A.I., Korobeinichev O.P., Shaklein A.A., Bolkisev A.A., Kumar A., Shmakov A.G. Numerical study of horizontal flame spread over PMMA surface in still air // Applied Thermal Engineering. 2018. Т. 144. С. 937-944.

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Российского научного фонда  
(Проект № 20-19-00295, Коробейничев О.П.,  
Трубачев С.А., Палецкий А.А.)  
и Российского фонда фундаментальных  
исследований (Проект № 20-08-00481\_а,  
Карпов А.И., Шаклеин А.А.).*

УДК 621.9

## ПЕРЕПАД ДАВЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ ДВУХФАЗНЫХ ЗЕОТРОПНЫХ СМЕСЕЙ

Шамирзаев А.С.

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

В настоящее время, большое внимание уделяется исследованию перепада давления при течении зеотропных смесей. Анализ, проведённый в работе [1], подчеркивает проблемы оптимизации систем на базе цикла Джоуля Томсона. При проектировании и оптимизации теплообменного оборудования важнейшим аспектом анализа является точная оценка падения давления в системе. В работе [2] получен большой набор данных по перепаду давления при кипении зеотропных смесей с большим температурным глайдом от 53 до 135 градусов в каналах 0,5 и 1,5 мм в диапазоне массовых скоростей до 250 кг/м<sup>2</sup> с и тепловых потоков до 120 кВт/м<sup>2</sup>. Проведено сравнение с большим количеством моделей. Показано, что существующие модели плохо описывают сопротивление при течении смесей с большим температурным глайдом. Отклонение экспериментальных данных от расчётных зависимостей наилучшим образом описывающих экспериментальные данные может превышать 100% в области сильных изменений концентраций компонент в фазах.

Целью данной работы является разработка подхода позволяющего рассчитывать перепад давления при течении парожидкостных зеотропных смесей.

Основной особенностью зеотропных парожидкостных потоков является изменение состава паровой и жидкой фазы по течению. Изменение давления по длине канала вызывает смещение фазового равновесия, что, в свою очередь, вызывает изменение состава жидкой и паровой фаз, из-за чего изменяется плотность фаз. Таким образом, в таких течениях происходит существенное изменение теплофизических свойств по длине канала. При этом не только газ, но и жидкость нельзя считать несжимаемой. В таких условиях особое внимание следует уделить вкладу ускорения потока на полный перепад давления.

Градиент давления при течении парожидкостного потока в горизонтальном канале можно представить в виде суммы потерь давления на трение и на ускорение потока в виде

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right) = -\left(\frac{dP}{dz}\right)_F + \left(\frac{dP}{dz}\right)_a \quad (1)$$

В условиях фазового равновесия зеотропных смесей давление и температура определяет концентрацию компонент, и зависимость потерь на ускорение потока можно представить в виде.

$$\frac{dP}{dz}\bigg|_a = G^2 \Omega_x \frac{dx}{dz} + G^2 \Omega_P \frac{dP}{dz} + G^2 \Omega_T \frac{dT}{dz} \quad (2)$$

Для определения частных производных удельного объёма по температуре и давлению можно использовать уравнения состояния. Ускорение потока зависит как от градиента давления, так и от градиента температуры по длине канала. Для зеотропного парожидкостного потока в условиях равновесия температура и

давление однозначно определяют энтальпию потока. Таким образом, зная изменение энтальпии по потоку, можно установить связь между изменением температуры и давления в потоке.

Изменение удельной энтальпии по длине

$$\frac{dH}{dz} = C_P \frac{dT}{dz} + \left[ V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right] \frac{dP}{dz} \quad (3)$$

При течении зеотропных парожидкостных потоков задачу определения потерь давления связанную с ускорением потока нельзя рассматривать как независимую. Для определения перепада давления нужно решать совместно систему уравнений (1–3) используя верифицируемую модель для расчёта трения определяющих давление и температуру в системе.

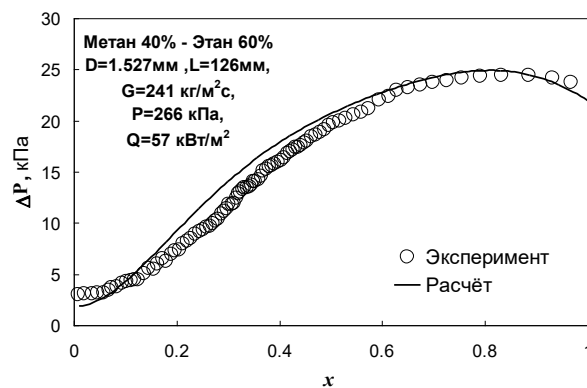


Рис.1. Сравнение экспериментальных данных из работы [1] с расчётом по предложенной модели.

Проведена верификация данного подхода на данных из [2] используя модель трения из [3]. Использовано допущение что паровая и жидкостная фазы находятся в равновесии. Сравнение результатов расчёта с экспериментом, представленное на рис.1, показало хорошее соответствие рассчитанных значений экспериментальным данным.

### Список литературы:

1. Barraza R. S. et al. Experimental facility to measure heat transfer and pressure drop of boiling zeotropic multi-component mixtures in a horizontal tube //Science and Technology for the Built Environment. – 2016. – Т. 22. – №. 1. – С. 2–14.
2. Barraza R. et al. Measured and predicted frictional pressure drop for boiling zeotropic mixed refrigerants in horizontal tubes //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Т. 98. – С. 285–298.
3. Awad M. M., Muzychka Y. S. Effective property models for homogeneous two-phase flows //Experimental Thermal and Fluid Science. 2008. Т. 33. №. 1. С. 106–113.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 22-29-00168.

УДК 536.242

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ИЗОБУТАНА 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. Одним из таких углеводородов является изобутан. Кроме того, изобутан имеет более высокую теплоту парообразования по сравнению с широко используемыми гидрофторуглеродами, что может приводить к повышению эффективности теплообменных устройств, использующих изобутан [1]. Исследование теплообмена при кипении изобутана в перспективных микроканальных двухфазных системах охлаждения является актуальной задачей. Целью данной работы является экспериментальное исследование теплообмена при кипении изобутана в щелевом микроканальном теплообменнике в условиях вынужденной конвекции в диапазоне параметров, практически важном для развития систем охлаждения микроэлектроники и космической техники.

Эксперименты проведены на теплообменнике, изготовленном из медного блока марки М1 с смонтированными нагревателями на верхней части которого фрезерованы 2 микроканала сечением  $2 \times 0.3$  мм закрытые крышкой из нержавеющей стали 12Х18Н10 толщиной 2 мм. Эксперименты выполнены в диапазоне массовых скоростей от 270 до 1150  $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$  при абсолютном давлении в системе в диапазоне 3.5–4.5 бар. Подробное описание экспериментальной установки представлено в работе [2].

Экспериментально получены кривые кипения при различных массовых расходах 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 коэффициенты теплоотдачи слабо зависят от массовой скорости и сильно от теплового потока, в то же время наблюдается интенсификация теплоотдачи по сравнению с кипением в большем объеме рассчитанному по [3]. Полученные кривые кипения для различных массовых расходов показаны на рис.1.

Получены данные по зависимости критического теплового потока при течении насыщенного изобутана от массовой скорости. Наилучшее соответствие экспериментальным данным по критическому тепловому потоку показывает модель из [4] хорошо соответствующая эксперименту в диапазоне массовых скоростей до 800  $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$ , рис.2.

Анализ данных по перепаду давления, с учетом влияния пузырькового кипения на перепад давления по модели [5] показал, что пузырьковое кипение должно подавляться с ростом теплового потока и массового расхода, но подавления теплоотдачи при этом не наблюдается.

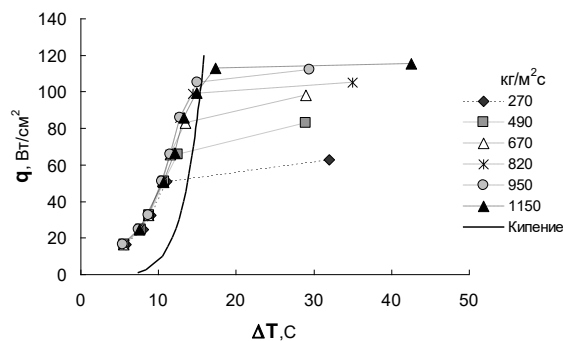


Рис.1. Зависимость теплового потока от перегрева стенки относительно температуры насыщения для различных массовых скоростей.  $T_{\text{sat}}=28\text{C}$ .

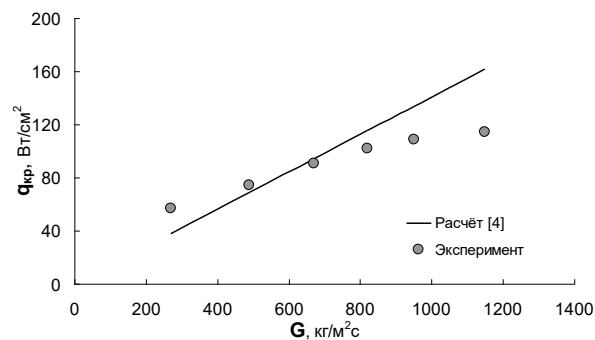


Рис.2. Зависимость критического теплового потока от массового расхода.

Основным механизмом, определяющим теплоотдачу насыщенного изобутана в щелевых каналах, по видимому, является испарение длинных газовых снарядов и кипение в коротких жидких перемычках.

### Список литературы:

- Anwar Z., Palm B., Khodabandeh R. Flow boiling heat transfer and dryout characteristics of R600a in a vertical minichannel //Heat Transfer Engineering. – 2015. – Т. 36. – №. 14-15. – С. 1230–1240.
- 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.
- Jung D. et al. Nucleate boiling heat transfer coefficients of flammable refrigerants //International Journal of Refrigeration. – 2004. – Т. 27. – №. 4. – С. 409–414.
- Wu Z., Li W., Ye S. Correlations for saturated critical heat flux in microchannels //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2011. – Т. 54. – №. 1-3. – С. 379–389.
- Kim S.M., Mudawar I. Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for mini/micro-channel saturated flow boiling //Int J Heat and Mass Transf. 2013. Т. 58. №. 1-2. С. 718–734.

Работа выполнена при поддержке государственного бюджета. Номер регистрации проекта 121031800215-4.

УДК 536.242

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СИСТЕМОЙ ЗАТОПЛЕННЫХ МИКРОСТРУЙ

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 активно исследуется применительно к охлаждению компонентов силовой электроники. Опубликованные работы показывают, что струйное охлаждение является актуальной технологией для охлаждения теплонапряженных элементов силовой электроники. Однако исследований посвященных затопленным струям в условиях высоких тепловых потоков с кипением немного [1]. Настоящее исследование направлено на исследование влияния диаметра микроструй, скорости жидкости и теплового потока для системы затопленных микроструй в широком диапазоне параметров от однофазной конвекции до критического теплового потока.

Проведено экспериментальное исследование теплообмена при охлаждении водой теплонапряженной поверхности, с использованием 6 затопленных микроструй, расположенных в горизонтальном щелевом микроканале. Охлаждаемая поверхность – торец медного нагреваемого цилиндра диаметром 1 см. Микроструи равномерно распределены по окружности диаметром 5 мм. Расстояние от решетки формирователя микроструй до охлаждаемой поверхности 1 мм. Эксперименты проведены с двумя размерами микроструй диаметром 174 и 327 микрон.

Определены механизмы теплообмена и критические тепловые потоки, установлены зависимости коэффициентов теплоотдачи при микроструйном охлаждении теплонапряженной поверхности водой от величины теплового потока и массового расхода охлаждающей жидкости.

Проведено сравнение полученных данных с расчётом теплообмена учитывающим влияние однофазной конвекции и недогретого кипения в виде

$$q_W^2 = \left( h_{con} \left( \frac{\mu_{L,W}}{\mu_{W,Sub}} \right)^N (T_W - T_{Sub}) \right)^2 + (h_{boil}(T_W - T_{Sat}))^2$$

Здесь  $T_W$  – температура стенки  $T_{Sat}$  – температура насыщения,  $T_{Sub}$  – температура натекающей жидкости,  $h_{boil}$  – коэффициент теплоотдачи при кипении по уравнению С.С. Кутателадзе [2],  $h_{con}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи при струйном охлаждении по модели из [3]. Показатель степени  $N$  учитывающий интенсификацию конвективной теплоотдачи из-за изменения свойств жидкости с температурой равен – 0.14 для ламинарных струй ( $Re < 2000$ ) и – 0.11 для турбулентных струй ( $Re > 2000$ )

Установлено, что в диапазоне тепловых потоков до 400 Вт/см<sup>2</sup> и скоростей струй от 4 до 10 м/сек данные хорошо согласуются с расчётом по модели конвективного теплообмена из работы [3] при увеличении скорости в струях расчёт начинает занижать коэффициенты теплоотдачи по сравнению с экспериментальными данными.

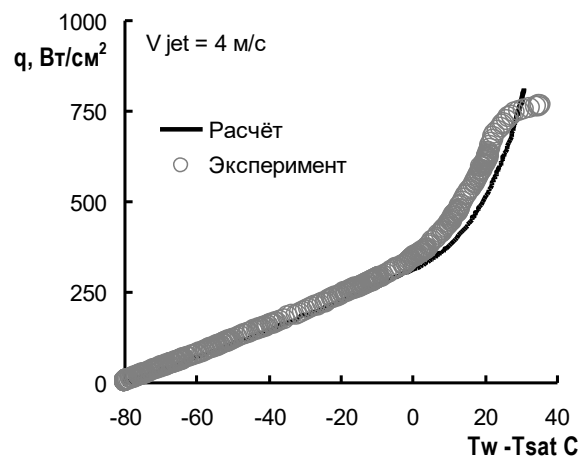


Рис. 1. Кривая кипения для струй диаметром 327 микрон при скорости в струях 4 м/с. Температура охлаждающей жидкости 22°C.

При скорости струй 4 м/сек, данные хорошо согласуются с расчётом по предложенному уравнению, смотри рис. 1. С увеличением скорости струй и увеличением теплового потока наблюдается увеличение теплоотдачи по сравнению с расчётом. Критический тепловой поток для струй диаметром 327 микрон при скорости в струях 4 м/с составил 760 Вт/см<sup>2</sup>, а для струй диаметром 174 микрон при скорости в струях 5 м/с, составил 930 Вт/см<sup>2</sup>. При скоростях выше 5.5 м/с критический тепловой поток не достигался. Максимальный достигнутый тепловой поток составил 962 Вт/см<sup>2</sup>, при этом ограничение на величину теплового потока определялось максимальной температурой нагревательных элементов.

Полученные данные показывают, что уменьшение диаметра и увеличения скорости струй существенно интенсифицирует теплоотдачу, но при этом так же вырастает перепад давления на формирователе струй. Установлены пределы применимости модели из [3] для расчёта конвективного теплообмена для систем микроструй с высокой скоростью жидкости (до 20 м/сек)

### Список литературы:

1. de Brún C. et al. Confined jet array impingement boiling //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2017. – Т. 86. – С. 224-234.
2. Кутателадзе С.С. Теплообмен и гидравлическое сопротивление. Руководства //М.: Энергоатомиздат. – 1990.
3. 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 поддержке гранта РФФИ №21-19-00626.

УДК 544.452.42, 536.462

## ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЛАМИНАРНОМ БЕДНОМ ПЛАМЕНИ ЭТИЛЕНА МЕТОДОМ ПЛИФ

Шараборин Д.К.

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

Этилен является ключевым промежуточным продуктом в окислении высших алканов и алкенов и, таким образом, играет важную роль в химии сгорания большинства видов топлива, используемых на практике. Помимо этого, этилен является очень реакционноспособным топливом и одним из важнейших продуктов нефтехимии, получаемый путем парового крекинга [1]. Проектирование и оптимизация энергоэффективных, компактных и соответствующих современным экологическим требованиям к выбросам энергетических установок невозможно без применения методов численного моделирования физических процессов, протекающих в камерах сгорания. Несмотря на значительные успехи применения численных методов в области гидродинамики в задачах, связанных с горением, расчеты остаются сложными и затратными из-за большого количества химических реакций (от нескольких десятков до сотен), и необходимости учитывать изменение плотности и состава газовой смеси. Используемые численные модели нуждаются в валидации, для которой могут быть использованы экспериментальные данные, полученные в более простых условиях, чем на реалистичных горелочных устройствах.

В данной работе проведено экспериментальное измерение пространственного распределения температуры в ламинарном пламени предварительно перемешанной смеси этилен/воздух со значительным избытком окислителя. Оценка температуры проводилась с использованием метода панорамной лазерно-индуцированной флуоресценции, который основан на возбуждении двух различных переходов электронно-колебательных состояний гидроксильного радикала (two-line OH PLIF).

Измерения проводились в ламинарном коническом пламени Бунзена, стабилизированном на кромке осесимметричного сужающегося сопла. Число Рейнольдса для струи, истекающей из сопла диаметром 15 мм, составляло  $Re=1000$ , коэффициент избытка топлива  $\varphi=0.68$ . Метод термометрии был реализован с использованием двух независимых OH PLIF систем, синхронизированных генератором импульсов (модель BNC 575). Одна из систем PLIF состояла из перестраиваемого лазера на красителях (Quantel TDL+), лазера накачки Nd: YAG (Quantel YG980 с энергией 0.5 Дж в импульсе на длине волны 532 нм) и чувствительной в ультрафиолетовом диапазоне интенсифицированной ПЗС-камеры (PCO Dicom Pro, 12-бит изображения с разрешением  $1024 \times 1024$  пикселей). Другая система

также состояла из перестраиваемого лазера на красителях (Sirah Precision scan), импульсного лазера накачки Nd: YAG (QuantaRay, энергия приблизительно 0.7 Дж в импульсе на длине волны 532 нм) и камеры (LaVision Imager sCMOS, 16-бит изображения с разрешением  $2560 \times 2160$  пикселей), подключенной к усилителю (LaVision IRO). Интенсифицированные камеры были оснащены УФ-объективами (LaVision 100 мм,  $f\#=2.8$ ) и полосовыми оптическими фильтрами (LOT-Oriel с коэффициентом пропускания 17% на 310 нм с шириной на полувысоте 11 нм). Для реализации метода two-line OH PLIF использовалась комбинация двух линий  $Q_1(5)$  и  $Q_1(14)$  полосы переходов (1-0) электронной системы  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$  в качестве одной из наиболее эффективных пар, согласно работе [2]. Средняя энергия импульсов перестраиваемых лазеров для этих переходов составляла приблизительно 3 и 15 мДж, соответственно.

Зарегистрированные интенсифицированными камерами изображения после коррекции перспективы, 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. Результатом обработки являются два изображения с распределением интенсивности сигнала флуоресценции при возбуждении двух линий. Отношение интенсивности двух сигналов флуоресценции соотносится с температурой в соответствии с населенностью основных состояний по распределению Больцмана [3]. Полученные мгновенные распределения температуры могут быть в дальнейшем использованы для верификации численных моделей.

### Список литературы:

1. Ren T., Patel M.K., Blok K. Steam cracking and methane to olefins: Energy use, CO<sub>2</sub> emissions and production costs // Energy. Elsevier Ltd, 2008. Vol. 33, № 5. P. 817–833.
2. 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. Vol. 28, № 5.
3. 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. Vol. 47, № 31. P. 5871.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.*

УДК 532.54

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПАДА ВИХРЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДВУХ НЕСМЕШИВАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ

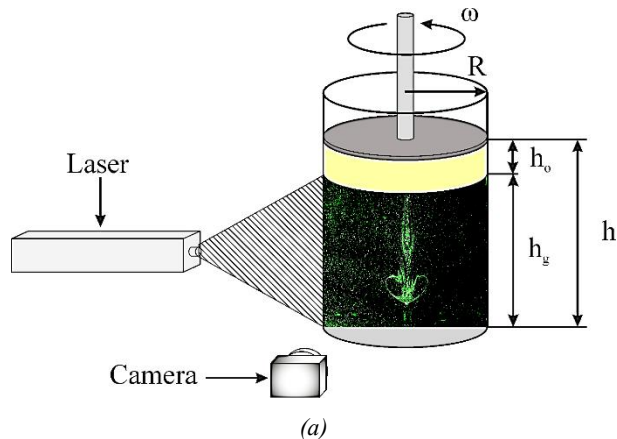
Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В., Штерн В.Н.

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

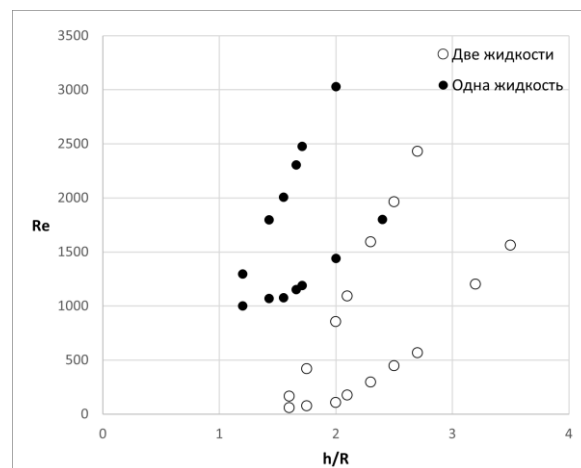
Во многих вихревых аппаратах существует взаимодействие вращающейся рабочей жидкости с другой жидкостью или газом, например, при неполном заполнении реактора рабочей жидкостью [1-3]. Для экспериментального моделирования химических и биологических реакторов заполненных двумя несмешиваемыми средами удобно использовать систему двух несмешиваемых жидкостей в цилиндрическом контейнере с вращающимся торцом (диском) из-за канонической формы геометрии и малого количества определяющих параметров [3, 4].

В настоящей работе проведено исследование возникновения, эволюции и исчезновения распада вихря в замкнутом цилиндре с верхним вращающимся торцом при наличии переменного слоя более легкой жидкости между рабочей средой и закручивающим устройством (диском), представленная на рисунке 1(а), где  $h_g$  – высота слоя нижней жидкости,  $h_o$  – высота слоя верхней жидкости. Высота системы двух жидкостей определялась как  $h = h_g + h_o$ . Исследование проводилось в цилиндрическом прозрачном контейнере ( $R = 47$  мм), с верхним вращающимся торцом. В качестве рабочих жидкостей использовались подсолнечное масло (переменный слой) и 33 % водный раствор глицерина, плотность и кинематическая вязкость которых составляла  $916$  кг/м<sup>3</sup>,  $49$  мм<sup>2</sup>/с и  $1080$  кг/м<sup>3</sup>,  $2,7$  мм<sup>2</sup>/с, соответственно. В ходе экспериментального исследования высота слоя нижней жидкости (одноглицериновый раствор 33 %) была фиксирована  $h_g = 1,5R$ , тогда как высота верхней жидкости ( $h_o$  (подсолнечное масло) варьировалась от  $0,1R$  до  $1,25R$ , обеспечивая суммарную высоту  $h$  от  $1,51R$  до  $2,75R$ . Число Рейнольдса  $Re = \omega R^2 / \nu_o$  считалось по вязкости верхней жидкости. Для наблюдения картины вихревого движения применялись методы цифровой трассерной визуализации (PIV) и адаптивной трековой визуализации.

Проведенные исследования показали, что наблюдается практически одинаковая тенденция на карте режимов ( $Re$ ,  $h/R$ ) существования пузыревидного распада вихря в замкнутом цилиндре при использовании одной жидкости и двух несмешиваемых жидкостей, где число Рейнольдса ( $Re$ ) определяется по вязкости прилегающей к диску жидкости (см. рис. 1(б)). Выявлено, что слой более легкой жидкости между вращающимся верхним диском и рабочей средой не влияет на формирование динамики распада вихря, сдвигая при этом диаграмму в область меньших чисел Рейнольдса, что связано с большой разницей между вязкостью жидкости рядом с вращающимся диском и вязкостью нижней рабочей жидкости.



(а)



(б)

Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а), диаграмма пузыревидного распада вихревого движения для случая одной и составной среды (б).

### Список литературы:

1. Savelyeva A. V. et al. Analysis of the efficiency of recombinant Escherichia coli strain cultivation in a gas-vortex bioreactor // Biotechnology and Applied Biochemistry, 2017, Vol. 64(5), P. 712–718.
2. Skripkin S.G., Tsoy M.A., Naumov I.V. Visualization the different type of vortex breakdown in conical pipe flow with high cone angle // Journal of Flow Visualization and Image Processing, 2021, Vol. 28(2), P. 43–53.
3. Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В. Передача углового момента через границу раздела двух несмешиваемых жидкостей // Теплофизика и аэромеханика, 2021, Т. 28, № 1, С. 67–78.
4. Naumov I.V., Sharifullin B.R., Tsoy M.A., Shtern V.N. Dual vortex breakdown in a two-fluid confined flow // Physics of Fluids. 2020. Vol. 32(6). P.061706.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-19-00083.



УДК 536.24

## ЗАВИСИМОСТЬ КОНДЕНСАЦИОННОГО РОСТА ЛЕВИТИРУЮЩИХ МИКРОКАПЕЛЬ ОТ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Шатекова А.И., Зайцев Д.В.

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

Механизм образования микрокапель жидкости, левитирующих над тонким слоем жидкости, связан с движением вверх горячей паровоздушной смеси (течение Стефана) в область более низких температур, 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 капли в конечном итоге поднимаются над поверхностью, часто создавая большие упорядоченные массивы. На рис. 1 представлена типичная фотография двумерного массива. Систематические экспериментальные исследования явления левитации микрокапель над тонким слоем жидкости были проведены сравнительно недавно. В работах [1–3] была исследована левитация обширных (нелокализованных) упорядоченных массивов микрокапель, левитирующих над поверхностью нагретого слоя жидкости.

В работе [2], впервые показана возможность левитации и самоорганизации микрокапель не только над поверхностью жидкости, но и над твердой подложкой. Была разработана аналитическая модель левитации микрокапли над сухой поверхностью, основанная на представлении капли в виде точечного испаряющего источника и использовании метода изображений для оценки скорости потока вокруг капли. Данная модель позволяет хорошо описывать экспериментально измеренную высоту левитации для сравнительно небольших капель [2]. Учет в модели размера капли и неоднородности её температуры позволил описать высоту левитации и для более крупных капель [3]. Для описания левитации микрокапель над пленкой жидкости в модель был добавлен поток пара от жидкой поверхности [4].

Однако механизм взаимодействия капель друг с другом, в настоящее время остается невыясненным. В связи с этим целью работы является исследовать геометрические характеристики двумерного массива в зависимости от разных параметров эксперимента.

В частности, в работе впервые была исследована зависимость скорости роста капель от температуры подложки и относительной влажности окружающего воздуха. Было установлено, что с ростом влажности окружающего воздуха скорость роста капель незначительно уменьшается. На рис. 2 представлен график зависимости скорости роста капель (угловой коэффициент в линейном уравнении зависимости диаметра капли от времени) от температуры подложки. Как видно из графика, скорость роста капель прямо пропорциональна температуре подложки. Это связано с тем, что с ростом температуры подложки увеличивается интенсивность испарения слоя жидкости и как следствие капли конденсируются быстрее.

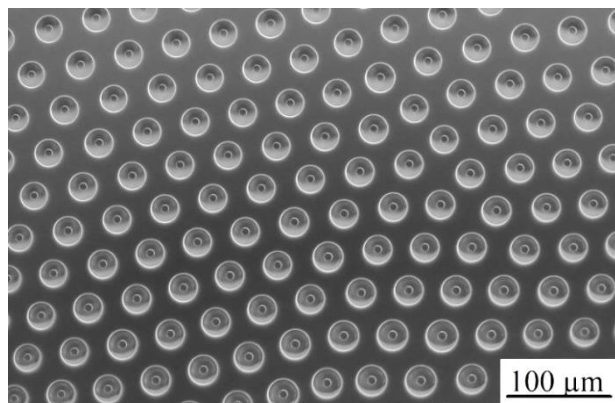


Рис. 1. Вид сверху на упорядоченный двумерный массив из левитирующих микрокапель жидкости. Параметры эксперимента: температура подложки  $T_w = 71.8^\circ\text{C}$ , средняя толщина слоя жидкости 0.5 мм.

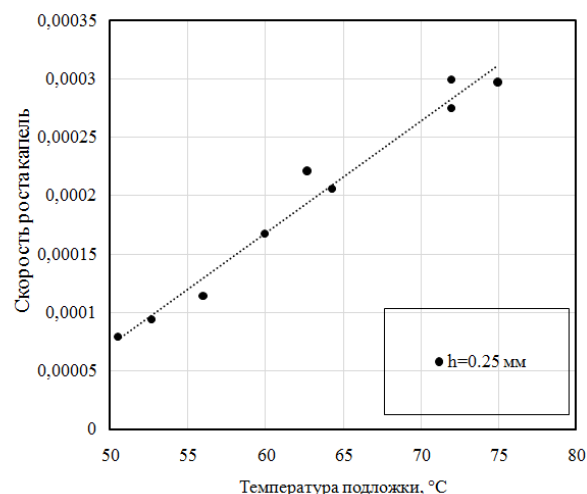


Рис. 2. Зависимость скорости роста микрокапель от температуры подложки.  $h$  – начальная толщина слоя жидкости.

### Список литературы:

1. Zaitsev D. V., Kirichenko D. P., Shatekova A. I., et. al. Experimental and theoretical studies of ordered arrays of microdroplets levitating over liquid and solid surfaces // *Interfacial Phenomena and Heat*, 2018. V. 6. №3.
2. Zaitsev D. V., Kirichenko D. P., Ajaev V. S., et. al. Levitation and self-organization of liquid microdroplets over dry heated substrate // *Physical Review Letters*. 2017. Vol. 119. Issue 9. Article 094503.
3. Ajaev V. S., Zaitsev D. V., Kabov O. A. Levitation of evaporating microscale droplets over solid surfaces // *Physical Review Fluids*. 2021. V. 6. №. 5. P. 053602.
4. Zaitsev D. V., Kirichenko D. P., Kabov O. A., et. al. Levitation conditions for condensing droplets over heated liquid surfaces // *Soft Matter*. 2021. V. 17. P. 4623-4631.

УДК 662.765, 662.763.1

## ПАРОВАЯ И ПАРОУГЛЕКИСЛОТНАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ БИОМАССЫ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ

Шевырёв С.А., Беседин Д.С., Сезонов П.А.

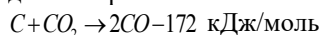
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,  
650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Использование возобновляемых ресурсов в мире рассматривается как перспективное направление для замещения традиционных энергоресурсов [1], представленных, например, в виде угля, нефти и газа.

В качестве одного из главных возобновляемых ресурсов можно рассматривать биомассу в качестве древесины, соломы, рисовой шелухи, скорлупы орехов и других материалов. Использование биомассы в энергетике позволяет снизить воздействие на окружающую среду за счет сокращения выбросов вредных веществ, в том числе за счет сокращения выбросов CO<sub>2</sub>.

Одним из современных рациональных способов применения биомассы является ее газификация с получением генераторного газа различного состава. В этом процессе можно сочетать различные газифицирующие агенты, однако с точки зрения высокого качества получаемого генераторного газа необходимо использовать перегретый водяной пар. Он позволяет получить в генераторном газе значительное количество целевых продуктов в виде CO и H<sub>2</sub>, причем концентрация водорода в объеме получаемого газа значительно превосходит содержание CO.

Увеличить содержание CO в получаемом газе можно путем реализации реакции Будуара при добавлении CO<sub>2</sub> в водяной пар:



Использование углекислого газа в данной реакции помимо увеличения содержания CO позволяет также сократить его выбросы в окружающую среду.

Проверка максимального эффекта от использования пароуглекислотной смеси при воздействии на состав получаемого генераторного газа представляет собой важную задачу. Особенно это актуально при моделировании процессов газификации в двухстадийных газогенераторах, которые в настоящее время рассматриваются в качестве перспективных.

С целью проверки перспектив использования CO<sub>2</sub> в качестве добавки к водяному пару была проведена серия экспериментальных исследований в лабораторном газогенераторе кипящего слоя, имитирующем работу камер двухстадийного газогенератора [2].

В качестве биомассы использовались древесные пеллеты (рисунок 1) следующего состава:

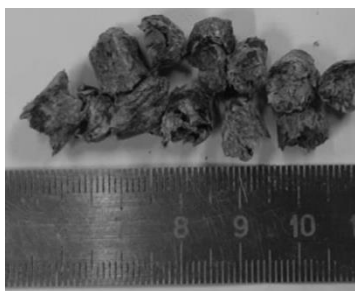


Рис. 1. Древесные пеллеты для газификации

Таблица 1. Технический анализ биомассы.

Материал	W <sup>a</sup> , %	A <sup>d</sup> , %	V <sup>daf</sup> , %
Биомасса	1,7	7,63	82,61

Таблица 2. Теплота сгорания биомассы.

Материал	Q <sup>a, v</sup> , МДж/кг
Биомасса	20,6

Таблица 3. Элементный анализ биомассы.

Материал	C <sup>daf</sup> , %	H <sup>daf</sup> , %	N <sup>daf</sup> , %	S <sup>daf</sup> , %	O <sup>daf</sup> , %
Биомасса	53,56	6,82	0,13	0	39,49

В результате экспериментальных исследований был установлен состав газа в квазистационарных условиях при различной температуре и расходе парового пара и пароуглекислотной смеси. С целью адекватного сравнения влияния добавки CO<sub>2</sub> проведено сравнение состава газа при паровой бескислородной газификации и пароуглекислотной.

Сопоставление состава газа выполнено после пересчета компонентов получаемого газа к одинаковым условиям. В результате для квазистационарного режима получено:

Компонент	Биомасса, расход газифицирующего агента около 72 л/мин					
	Температура пароуглекислотной смеси на входе в газогенератор, °С					
	750		850		950	
	без CO <sub>2</sub>	с CO <sub>2</sub>	без CO <sub>2</sub>	с CO <sub>2</sub>	без CO <sub>2</sub>	с CO <sub>2</sub>
H <sub>2</sub>	49,88	46,83	52,36	58,24	54,25	58,54
CO	10,24	15,63	9,8	11,08	10,08	12,39
CO <sub>2</sub>	31,61	29,78	31,03	28,2	31,29	25,51
CH <sub>4</sub>	8,26	7,73	6,78	2,46	4,36	3,54

По результатам экспериментальных исследований можно отметить, что использование CO<sub>2</sub> в качестве добавки к водяному пару позволяет повысить содержание CO в получаемом газе, а также понизить содержание CO<sub>2</sub>.

### Список литературы:

1. Watson J., Zhang Y., Si B., Chen W-T., de Souza R. Gasification of biowaste: a critical review and outlooks // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. V. 83. P. 1–17.
2. Shevyrev SA, Mazheiko NE, Yakutin SK, et al. Investigation of characteristics of gas and coke residue for the regime of quasi- and non-stationary steam gasification of coal in a fluidized bed: Part 1. Energy 2022; 251: 123938.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-79-00012).

УДК 532.517, 532.52, 532.574.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЯЧЕЙКИ ТВС

Шестаков М.В., Токарев М.П.

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

Безопасность и производительность ядерного реактора зависит от пространственных характеристик течения теплоносителя: полей скорости, давления, температуры теплоносителя и поверхностей ТВЭЛов, которые формируются при обтекании тепловыделяющей сборки реактора. Межканальный обмен и поперечное перемешивание имеет важное значение для достижения однородных полей температуры и скорости теплоносителя в тепловыделяющей сборке. Тепловыделяющая сборка, представляющая собой пучок цилиндрических стержней, формирует систему продольных сообщающихся каналов регулярной формы. Структура течения в единичном канале имеет сложный трехмерный характер и зависит от структуры течения в соседних каналах сборки. Учитывая сложный характер течения, исследование влияния пространственной структуры течения на процессы межканального теплопереноса проводят в упрощенных моделях ТВС [1]. Использование упрощенных моделей ТВС позволяет в контролируемых условиях детально исследовать пространственную структуру течения с использованием широкого арсенала панорамных оптических методов таких как PIV, PLIF, IR и Томо PIV. Численные исследования структуры турбулентного течения в зазоре между стержнями показали наличие квазипериодических вихревых структур [2]. Степень влияния данных структур на турбулентное перемешивание зависит от геометрических параметров сборки. Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния квазипериодических вихревых структур на процессы межканального теплопереноса.

В данной работе исследуется пространственная структура турбулентного течения в упрощенной модели периферической ячейки ТВС (рис. 1). Течение формируется при продольном обтекании трех трубок в канале с поперечным сечением, показанным на рисунке 1 б. Модель представляет собой прямоугольный канал с поперечным сечением  $20 \times 41 \text{ мм}^2$  и длиной 400 мм, внутрь которого на подложку установлены три оргстеклянные трубки с внешним диаметром 13 мм (рис 1 а). Зазоры между трубками равны 1 мм. Зазор между стенкой канала и цилиндрами, сформированный при помощи одинаковых вставок, равен 2 мм. Модель встраивалась в гидродинамический контур с баком постоянного уровня, системой термостабилизации и системой контроля расхода жидкости. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Измерения мгновенных полей скорости проводились при помощи PIV системы, состоящей из Nd:YLF New wave Pegasus лазера, цифровой камеры PCO.1200 hs с разрешением  $1280 \times 1024$  пикс, объектива Nikon Micro-Nikkor с фокусным расстоянием 60 мм и синхронизирующего процессора «Полис». Измерения проводились в нескольких сечениях параллельных стенке канала. Толщина лазерного

ножа в измерительной области составила 0,5 мм. Расчет мгновенных полей скорости производился при помощи программного обеспечения «ActualFlow».

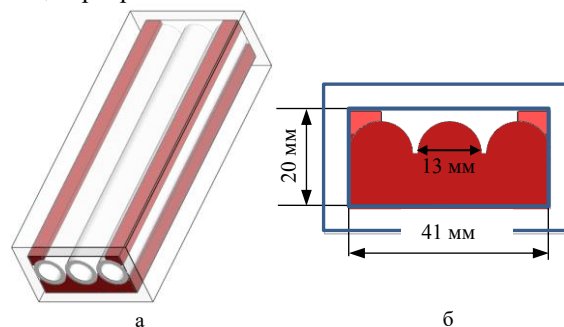


Рис. 1. Модель периферийной ячейки ТВС (а) и поперечное сечение канала (б).

Анализ полей скорости показал неравномерность в распределении мгновенной скорости. Особенностью структуры мгновенных полей скорости являются локальные протяженные «полосы» с повышенными значениями продольной скорости. Поля мгновенной и средней скорости характеризуются наличием сильной анизотропии потока. Отношение поперечной к продольной компоненте скорости составляет 10% в случае мгновенных и 1,5% в случае средних полей скорости. Распределение продольной компоненты средней скорости представлено на рис. 2. Сравнение результатов измерений с данными других авторов, полученных в моделях ТВС, показывает качественное воспроизведение гидродинамических характеристик полей скорости и пульсаций скорости.

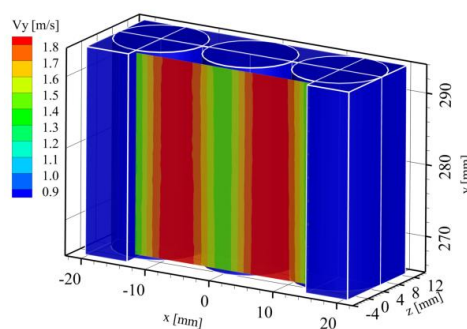


Рис. 2. Поле продольной компоненты средней скорости для сечения, расположенного на расстоянии 1 мм от цилиндра.

### Список литературы:

1. Bertocchi F., Rohde M., Kloosterman J.L. LDA measurements of coherent flow structures and cross-flow across the gap of a compound channel with two half-rods // Nucl. Eng. Des. 2018. V. 326. P. 17-30.
2. Yu Y.Q., Yan B.H., Cheng X., Gu H.Y. Simulation of turbulent flow inside different subchannels in tight lattice bundle // Ann. Nucl. Energy. 2011. V. 38 P. 2363–2373.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-19-00587.

УДК 536.524

## НУКЛЕАЦИЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ КАПЕЛЬ РАЗНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Шишкин Н.Е.

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

Исследования испарения капель продолжают интенсивно до настоящего времени. Такой интерес к такому простому объекту для изучения как капля вызван их присутствием во многих технологиях, в энергетике, при горении топлива. Несмотря на многостороннее изучение остаются еще вопросы к механизму массообмена при испарении.

Важным объектом для изучения является нуклеация, когда происходит зародышеобразование новой, стабильной фазы внутри жидкости. Исследования по кинетике зародышеобразования в метастабильных системах проводились с давних времен, начиная с Дж. Гиббса в 1878 г. и в последующих многочисленных работах. Если по существованию зародышей в виде нанопузырьков идет активное обсуждение, то стабильное присутствие крупных пузырьков подвергается сомнению: они могут схлопываться на более мелкие, под действием сил Архимеда всплывать.

В работе рассматривается испарение капель воды, ацетона, спирта размерами 0.5–5 мм в потоке сухого воздуха (влажность ~1–2%). Температура воздуха изменялась в пределах  $T_0 \sim 20\text{--}200^\circ\text{C}$ , скорость обтекания 1–4 м/с. Измерения проводились с помощью тепловизора Thermo Tracer TH7102MV, определялся размер капель и температура поверхности, которая оказалась неравномерной. Образование температурных пятен носило спонтанный характер, минимальная величина температуры для разных жидкостей соответствовала «температуре мокрого термометра».

Паровые пузырьки размерами ~3–80 нм, зафиксированные в работе [1], не поддаются прямым наблюдениям с помощью тепловизора, вследствие их малых размеров. Однако отбираемая энергия – «энергия фазового перехода» от среды окружающей пузырьки такова, что заметны изменения температуры на термограммах. Определяется температура охлажденных объемов жидкости, размерами ~0.1 мм, которые на три-четыре порядка больше, чем величина пузырьков. Таким образом, нанопузырьки, содержащие в себе молекулы пара с высокой энергией, остаются вне поля зрения, фиксируются же «температура адиабатического испарения» окружающие их массы жидкости.

Интенсивность выхода паровых зародышей  $\omega$ , определялось для единичного объема, ограниченной поверхностью капли и толщиной слоя вскипания, принятой за два пикселя. Количество выбросов пузырьков  $N$  подсчитывалось на очерченных окружностях площадках, поэтому был введен  $k$  – фактор формы, позволяющий оценить число центров вскипания на всей поверхности капли. Учитывалось время экспозиции кадров, было принято  $\tau = 0,25$  сек. Таким образом, количество центров вскипания  $\omega$  для единичного объема размерами  $\text{мм}^3$  определялось по формуле вида

$$\omega = N \cdot k / (\tau V) \quad (1)$$

В результате обработки результатов экспериментов были получены систематические данные об интенсивности выхода нанопузырьков. Влияние текущего размера капель на количество центров парообразования  $\omega$  показано на рис. 1, когда интенсивность зародышеобразования вырастает на порядок с уменьшением диаметра.

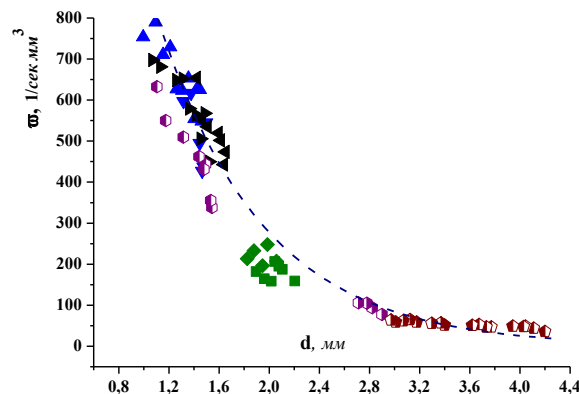


Рис. 1. Скорость нуклеации в зависимости от диаметра капли при  $T_0 \sim 23^\circ\text{C}$ .

На рисунке также нанесена аппроксимационная кривая (2), которой выражена количественная характеристика того как возрастает интенсивность  $\omega$  с уменьшением размера капель.

$$\omega = 3000 \cdot \exp(-d / 0.84) \quad (2)$$

Предлагается гипотеза испарения жидкости в результате выхлопа пузырьков пара с поверхности капли. Проведена оценка выхода зародышей паровой фазы вблизи межфазной границы, которая зависела от диаметра капли и температуры обтекающей струи. Предложены асимптотические зависимости для расчета  $\omega$  в критериальной форме.

Список литературы:

1. Popov E., He L., Dominguez-Ontiveros E., and Melnichenko Y.. Detection of vapor nanobubbles by small angle neutron scattering (SANS). APPLIED PHYSICS LETTERS 112, 153704 (2018).

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного контракта № 075-00383-21-00.

УДК 536.24

## ТЕПЛООБМЕН ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

**Штелинг В.С., Комов А.Т., Вершинина Ю.В., Дедов А.В., Захаренков А.В., Щербаков П.П.**

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Теплосъем с высокой плотностью энергии (уровня нескольких МВт/м<sup>2</sup>) имеет высокую актуальность в современной энергетике. Это особенно характерно при разработке экспериментальных термоядерных установок, а также для различных отраслей энергетики, микроэлектроники и аэрокосмических технологий. Одним из наиболее перспективных и эффективных способов охлаждения высокотемпературной поверхности является использование диспергированного теплоносителя.

В целом процесс теплообмена при охлаждении распылением поверхностей, имеющих температуру выше температуры насыщения теплоносителя, мало изучен: сложная физика, предполагающая одновременное взаимодействие распыляемых капель с охлаждаемой поверхностью, их испарение, конвекцию и конденсацию пара [1,2]. Вот почему экспериментальные исследования в данной области имеют большую актуальность.

Исследования термостабилизация поверхности с высокой плотностью энергии диспергированным потоком труднореализуемы, вследствие большой сложности эффективного нагрева поверхности с высокой плотностью теплового потока в лабораторных условиях. Методика нагрева, используемая в экспериментальном стенде, разработанном научной группой, достаточно уникальна, и позволяет исследовать столь сложный процесс в лабораторных условиях, с высокой воспроизводимостью полученных результатов, представленных работах [3,4].

В данной работе представлены результаты исследований охлаждения диспергированным потоком воды высокотемпературной поверхности на экспериментальном стенде, моделирующем энергонагруженные элементы термоядерных установок, для модернизированного рабочего участка, реализующего односторонний нагрев с высокой плотностью энергии, а также критериальное описание этого процесса.

Для первичного описания процесса теплообмена между стенкой и диспергированным потоком был выбраны следующие безразмерные комплексы:

$$Nu = \frac{\alpha d_{\text{капли}}}{\lambda_{\text{пара}}} - \text{число Нуссельта};$$

$$\theta = \frac{T_{\text{ст}} - T_S}{T_S} - \text{безразмерная температура};$$

$$Re = \frac{\omega_{np} d_{\text{пов}}}{V_{\text{воды}}} = \frac{G}{\rho S_{\text{пов}}} \frac{d_{\text{пов}}}{V_{\text{воды}}} = \frac{j d_{\text{пов}}}{\mu_{\text{воды}}} - \text{число Рей-нольдса, где } j - \text{массовая плотность диспергированного потока (плотность орошения мишени).}$$

Pr – число Прандтля при температуре стенки.

Окончательный вид критериального уравнения:

$$Nu = C Re^{n_1} \theta^{n_2} Pr^{n_3}$$

На рис. 1 и 2 приведено сравнение расчетов по критериальной зависимости с экспериментальными данными для режимов эффективной теплоотдачи и пленочного кипения соответственно.

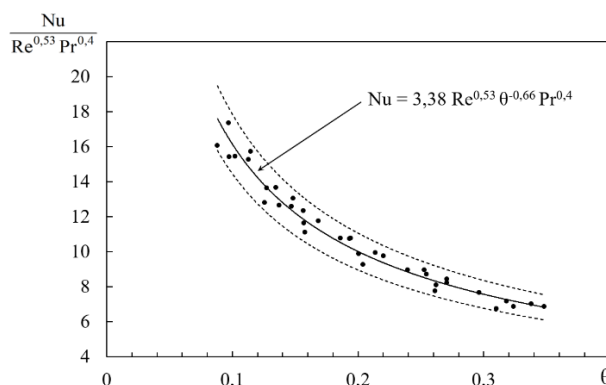


Рис. 1. Зависимость  $Nu / Re^{0.53} Pr^{0.4}$  от  $\theta$  для режима эффективной теплоотдачи.

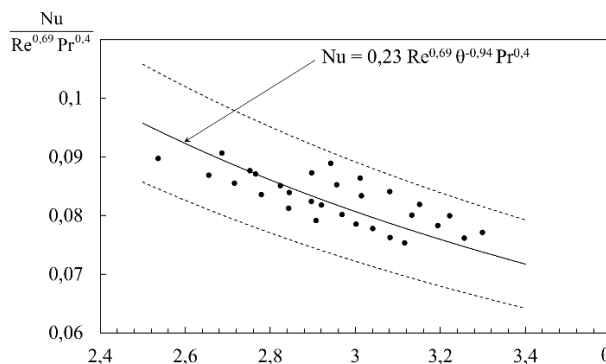


Рис. 2. Зависимость  $Nu / Re^{0.69} Pr^{0.4}$  от  $\theta$  для режима пленочного кипения.

### Список литературы:

1. Youssef, M.R. Modeling the effect of a spray on a liquid film on a heated surface / M.R. Youssef // PhD Thesis, Dept. of Civile and Environmental Engineer, West Virginia University, – 2007.
2. Study on heat transfer performance of spray cooling, model and analysis / Zhao, R., Cheng, W., Liu, Q., Fan, H. // Heat Mass Transfer. – 2010. – Vol. 46. – pp. 821–829.
3. A V Dedov, A T Komov, V S Shteling, P P Shcherbakov, V V Iliyn and A V Zakharenkov. Development of the design of a new working section cooled by a dispersed coolant flow for a stand with induction heating // 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2150.
4. Штелинг В.С., Ильин В.В., Комов А.Т., Щербаков П.П. Теплосъем и термостабилизация высокотемпературных поверхностей диспергированным потоком теплоносителя // Вестник МЭИ. 2021. № 5. С. 19–26. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-5-19-26.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №21-79-10179.*

УДК 532.5

## ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА ПОЛОСТИ И ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО БЛОКА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ОБОГРЕВАЕМОЙ ОБЛАСТИ

Шулепова Е.В., Шеремет М.А.

Томский государственный университет, 634050, Томск, пр. Ленина, 36

Естественная конвекция как один из механизмов переноса энергии встречается во многих инженерных и природных системах. Очень часто термогравитационная конвекция применяется для отвода энергии, когда другие режимы теплоотвода не могут быть реализованы [1]. В рамках настоящего исследования будет проведен численный анализ свободноконвективного теплопереноса в замкнутой наклонной дифференциально-обогреваемой полости при наличии внутреннего теплопроводного блока (рис. 1).

Область решения – квадратная полость с изотермическими вертикальными стенками и адиабатическими горизонтальными границами. Однородный теплопроводный твердый блок находится внутри полости. Полость может ориентироваться под различными углами к горизонту. При решении такой задачи естественной конвекции очень важно знать, насколько внутренний теплопроводный блок может ослабить или интенсифицировать теплоотвод от нагретой поверхности и каким образом ориентация силы тяжести влияет на рассматриваемый процесс.

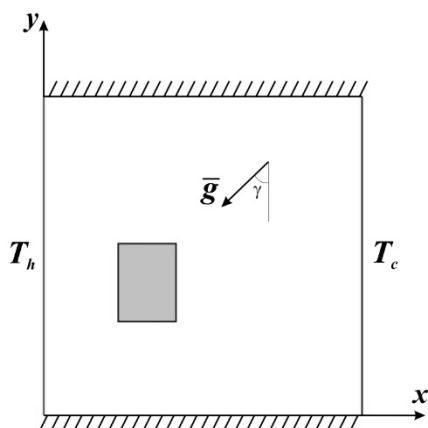


Рис. 1. Область решения.

Краевая задача математической физики, описывающая механизмы естественной конвекции внутри полости и теплопроводности внутри твердого блока, включает дифференциальные уравнения в частных производных, а также начальные и граничные условия. Дифференциальные уравнения Обербека–Буссинеска, используемые для описания естественной конвекции внутри полости, записаны на основе преобразованных переменных «функция тока – завихренность» [2]. На границе твердого теплопроводного блока формулируются граничные условия четвертого рода в случае идеального контакта, отражающие непрерывность температуры и плотности теплового потока.

Сформулированная краевая задача решается численно методом конечных разностей второго порядка точности [3]. Для решения уравнений параболического типа (уравнение дисперсии завихренности и уравнение энергии) используется локально-одномерная схема А.А. Самарского, позволяющая многомерную задачу сводить к системе одномерных задач. Аппроксимация конвективных слагаемых проводится с использованием монотонной аппроксимации А.А. Самарского, диффузионные слагаемые аппроксимируются центральными разностями. Полученные системы линейных алгебраических уравнений решаются методом прогонки. Разработанный вычислительный код был протестирован на множестве модельных задач, а также на множестве сеток [4, 5].

Численные исследования проведены в широком диапазоне изменения определяющих параметров, характеризующих режимы естественной конвекции внутри полости и теплопроводности внутри твердого блока: число Рэлея ( $Ra=10^4-10^6$ ); число Прандтля ( $Pr=6.82$ ); угол наклона полости ( $\gamma=0-2\pi$ ); положение, размеры и материал внутреннего твердого элемента также варьировались.

В результате моделирования получены распределения изолиний функции тока и температуры, отражающие гидродинамику и тепловое состояние области исследования. Показана возможность интенсификации теплоотвода за счет введения такого внутреннего блока. Продемонстрировано влияние угла наклона полости на интенсивность теплообмена.

### Список литературы:

1. S. Husain, M. Adil, M. Arqam, B. Shabani. A review on the thermal performance of natural convection in vertical annulus and its applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 150. – 111463.
2. Pop I., Sheremet M.A., Grosan T. Thermal convection of nanofluid in a double-connected chamber // *Nanomaterials*. – 2020. – Vol. 10(3). – 588.
3. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
4. M.K. Das, S.K. Reddy. Conjugate natural convection heat transfer in an inclined square cavity containing a conducting block // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2006. – Vol. 49. – P. 4987–5000.
5. F. Garoosi, M.M. Rashidi. Two phase flow simulation of conjugate natural convection of the nanofluid in a partitioned heat exchanger containing several conducting obstacles // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2017. – Vol. 130. – P. 282–306.

*Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).*

УДК 621.039

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЛЕРАНТНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ

Щеклеин С.Е.

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

Взрывной рост населения планеты, радикальное повышение стандартов энергообеспечения имеют следствием резкое повышение объемов потребления энергоресурсов.

Следует констатировать, что грандиозные планы ученых по созданию в 20 веке принципиально новых энергетических источников, таких как управляемый термоядерный синтез, применение электрохимического преобразование химической энергии топлива в электрический ток, магнитогидродинамическое преобразование тепловой энергии в электричество с КПД выше 50–60% – не были реализованы. Основой современной энергетики остаются технологии преобразования природных топлив в теплоту (сжигание органических топлив, деление урана) с последующим термодинамическим преобразованием теплоты в механическую, а затем электрическую формы. За прошедшее столетие данные технологии прошли большой путь эволюционного развития и достигли высокой надежности и технического совершенства [1].

В тоже время основной процесс тепловой энергетики - сжигание органического топлива с использованием атмосферного воздуха приводит к труднопреодолимым негативным экологическим последствиям [2, 3]:

- поглощение огромного объема кислорода из атмосферы (более 10 кг/кг топлива);
- образование парникового газа CO<sub>2</sub> и паров воды, как продуктов окисления топлива;
- образование при высоких температурах горения окислов азота из атмосферного воздуха;
- образование отходов сгорания (зола, шлак) при использовании твердого топлива.

Из освоенных технологий надежного и экологически безопасного производства энергии на сегодняшний день в лидеры уверенно выходит атомная энергетика, основанная на использовании атомных электростанций с ядерными реакторами на тепловых нейтронах с урановым топливом и легко-водным замедлителем-теплоносителем [4].

Обладая высоким энергетическим потенциалом, позволяющим обеспечить быстрое увеличение энергопроизводства, данная технология имеет и ряд ограничений [5]:

- ограниченный объем разведанных в мире запасов урана (менее 10 млн. т);
- невозможность получения высоких термодинамических параметров теплоносителя (выше 360°С), вследствие использования в качестве материалов активных зон циркониевых сплавов (прозрачных для нейтронов тепловых энергий);
- низкий термодинамический и общий КПД (менее 35%);

- необходимость в большом количестве охлаждающей воды для организации термодинамического цикла;
- большой объемом паров воды, поступающих в атмосферу вследствие использования испарительных технологий охлаждения.

В данной работе приведено расчетное обоснование концепции расширения топливно-энергетической базы [6] и снижении объемов эмиссии парниковых газов при совместном использовании органического и ядерного топлива в структуре гибридных атомно-тепловых электростанций. Показано, что технологическая схема (выработка насыщенного пара в ЯППУ, а затем перегрев до максимально достигнутых в теплоэнергетике параметров за счет органического топлива) приводит к снижению удельных расхода газового топлива на производство электрической энергии на 25–30%, выбросов продуктов сгорания в 2,5 раза (по сравнению ТЭС), потребления технической воды (по сравнению с АЭС) в 1,5 раза.

Указывается, на возможность расширения топливной базы современно ядерной энергетики с реакторами на тепловых нейтронах путем использования освоенных (реакторы бридеры) и перспективных (гибридные термоядерные реакторы) технологий [7–9].

Коренным достоинством, рассмотренного комплекса- ЯППУ-ТЭС является его реализуемость в короткий период времени со значительным снижением углеродного следа в единице произведенной энергии, что является важным условием устойчивого роста энергетического производства при сохранении экологического равновесия в геосфере

### Список литературы:

1. Фаворский О.Н. Развитие энергетики России в ближайшие 20-30 лет// Теплоэнергетика №2, 2008, С. 2–3.
2. В.И. Данилов-Данилян, К.С. Лосев Экологический вызов и устойчивое развитие// Прогресс-Традиция, М., 2000. 379 с.
3. Щеклеин С.Е. Человек, энергия, природа// Екатеринбург: УГТУ, 1999. 59 с.
4. Асмолов В.Г., Гусев И.Н., Казанский В.Р., Поваров В.П., Стацура Д.Б. Головной блок нового поколения - особенности проекта ВВЭР-1200// Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 5–21.
5. Щепетина Т. Д. О повышении КПД энергоблоков с водо-водяными реакторами (ВВР) // Энергия: экономика, техника, экология. 2010. №12. С. 21–29.
6. Щеклеин С.Е. Роль энергетики в преодолении климатических угроз// Энергия: экономика, техника, экология. 2021. № 9. С. 18–30.
7. Пономарев-Степной Н.Н. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе БН и ВВЭР// Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 4. С. 183–190.
8. Адамов Е.О., Соловьев Д.С. Ядерная энергетика - вызовы и решения проблем// Энергетическая политика. 2017. № 3. С. 21–30.
9. Велихов Е.П., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Заметки о будущем ядерной энергетики// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. № 1. С. 5–14.

УДК 536.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ ТЕПЛОвого ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ВАРИАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Щербakov Г.Е.<sup>1,2</sup>, Герасимов А.С.<sup>1,2</sup>, Чохар И.А.<sup>1</sup>, Терехов В.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
gleb.shherbakov.99@mail.ru

В процессе жизнедеятельности человек обменивается теплотой с окружающей средой. Знание закономерностей теплообмена человека требуется в медицине для обоснования методик гипо-и гипертермии, разработки специальной одежды в авиации, МЧС, морском флоте. В имеющихся экспериментальных и расчетных исследованиях [1, 2] решен лишь ряд частных вопросов и эта проблема требует дальнейшего детального изучения.

В данной работе представлены результаты измерений тепловых потерь при вариации условий внешней среды. Проведен анализ всех компонентов теплового потока и их вклад в суммарный поток теплоты на отдельных участках кожи человека.

В качестве испытуемого выбран человек мужского пола, возраст – 22 года, вес 92 кг, рост 184 см. Обнаженный человек находился в лежачем положении в течение 30 минут в климатической камере со стабилизированной температурой и влажностью. Проведено 4 эксперимента: при окружающей температуре 20°, 30°, 35° и 45°С. Скорость воздуха в камере была минимальной, поэтому конвективный теплообмен с окружающей средой можно считать естественным. Датчики теплового потока, датчики температуры и влагоуловители располагались соответственно на правом плече, груди и животе и фиксировались на теле с помощью медицинского пластыря. Регистратор-измеритель параметров окружающей среды располагался на одном уровне высоты с испытуемым. Приспособления для улавливания пота взвешивались до и после эксперимента, в результате чего определялась массовая скорость испаряющейся влаги. Объектив тепловизора направлен на тело так, чтобы исследуемые участки тела были видны под прямым углом.

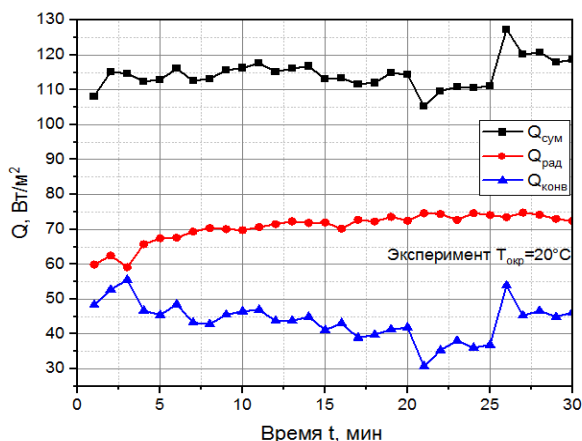


Рис. 1. Компоненты теплового потока в области живота,  $T_{окр}=20^{\circ}C$ .

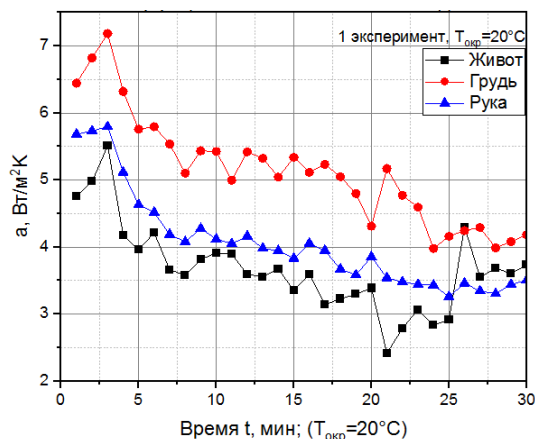


Рис. 2 Изменение коэффициента конвективной теплоотдачи,  $T_{окр}=20^{\circ}C$ .

В качестве примера на рис. 1 показано изменение компонентов теплового потока с течением времени при температуре окружающей среды 20°С. Приняв коэффициент излучения кожи близким к абсолютно черному телу [2], были посчитаны потери тепла излучением, а далее, на основе разности значений полного и лучистого теплового потока, получена и конвективная составляющая. Как видно, суммарный поток составляет порядка 100–120 Вт/м², а радиационная компонента превалирует над конвективной. Энергия, расходуемая на фазовый переход, для данных условий близка к нулю.

На рис. 2 показано изменение коэффициента конвективной теплоотдачи различных участков кожи человека. Более интенсивно обменивается теплотой область груди, а меньше всего - область живота. Численное значение коэффициента лежит в диапазоне  $\alpha=3-7$  Вт/м²·К, что является характерным для режима естественной конвекции.

В работе приведен анализ влияния параметров окружающей среды на теплообмен и сопоставление с данными, имеющимися в литературе.

Список литературы:

1. Richard J. de Dear. Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments. Int J Biometeorol (1997) 40:141–156.
2. James D. Hardy. The radiation of heat from the human body (III) The human skin as a black-body radiator. J Clin Invest. 1934;13(4):615–620.



УДК 532.6, 004.89

## ПРЕДСКАЗАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В МИКРОКАНАЛАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Ягодницына А.А.<sup>1,2</sup>, Плохих И.А.<sup>2</sup>, Ковалев А.В.<sup>1,2</sup>, Бильский А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Актуальность работы связана с бурным развитием микроканальных устройств и технологий. Экстремально высокое отношение площади поверхности к объему позволяет использовать микроканальные течения для снятия высоких тепловых потоков, проведения высокоэффективных реакций, а также создания лабораторий на чипе и органов на чипе. Газожидкостные течения и течения несмешивающихся жидкостей используются в различных приложениях в химии, биологии, медицине, материаловедении для проведения химических реакций [1] и процессов экстракции [2], инкапсулирования и сортировки биологических объектов [3], создания нано- и микрочастиц [4].

Для разработки и корректной работы микрофлюидных устройств с применением двухфазных течений требуется информация о режиме течения, на который влияют физические свойства жидкостей, расходы фаз, свойства материала микроканала и его геометрия. Сложная взаимосвязь большого числа определяющих параметров с режимами течения приводит к невозможности построения надёжных аналитических моделей, позволяющих подобрать комбинацию регулируемых параметров для получения необходимого режима работы системы. Сейчас, на практике применяют экспериментально полученные таблицы режимов, обобщенные в тех или иных координатах или полуэмпирические модели для предсказания. Существует довольно много таких моделей и обобщающих параметров, но все они не обладают необходимой универсальностью.

В настоящей работе для решения задачи предсказания режимов течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах применены методы машинного обучения. На основе результатов скоростной визуализации потоков в большом диапазоне физических свойств жидкостей и расходов фаз создана база данных по режимам течения, содержащая 6000 записей. Все режимы течения разделены на три класса: сегментированные режимы (снарядный/капельный), непрерывные режимы (параллельный/кольцевой) и переходные режимы. В качестве входных признаков для алгоритмов машинного обучения использованы числа Вебера и числа Онезорге дисперсной и несущей фаз. Для увеличения данных использован алгоритм SMOTE. Размер базы данных после процедуры аугментации равен 34 000 записей. Создана новая матрица полиномиальных признаков с суммой степеней от 3 до 6. 80% данных было использовано для обучения моделей, 20% – для тестирования.

В решении задачи классификации режима течения по входным признакам были использованы следующие алгоритмы машинного обучения: линейная регрессия, «случайный лес», метод опорных векторов со стохастическим градиентным спуском, дерево принятия решений. Наилучший результат был получен с

помощью алгоритма опорных векторов со стохастическим градиентным спуском (точность 91%).

На основе подготовленной базы данных и данных других авторов была обучена самонормализующаяся нейронная сеть [5] - полносвязная нейронная сеть, со специальными функциями активации и методом инициализации весов, с помощью которых удалось достичь автоматической сходимости нейронов сети во время обучения. Для обучения нейронной сети набор данных был разделен на тренировочный, валидационный и тестовый наборы в соотношении 6/2/2. С помощью данной нейронной сети удалось достичь точности определения режима течения 98%. На Рис. 1 показана матрица несоответствий выходных данных нейронной сети для тестового набора данных. Видно, что ошибка классификации сегментированного режима как непрерывный и наоборот мала, большую часть ошибок составляют «мягкие» ошибки алгоритма, когда переходной режим классифицируется как непрерывный или сегментированный и наоборот.

ИСТИННЫЙ	Сегментированный	0.8%	2.5%	96.7%
	Переходной	0	97%	3%
	Непрерывный	99.8%	0	0.2%
		Предсказанный		
		Непрерывный	Переходной	Сегментированный

Рис. 2. Матрица несоответствий самонормализующейся нейронной сети для тестового набора данных.

### Список литературы:

1. Wang K. et al. Liquid-liquid microflow reaction engineering // *React. Chem. Eng. Royal Society of Chemistry*, 2017. Vol. 2, № 5. P. 611–627.
2. Kriel F.H. et al. Microfluidic solvent extraction, stripping, and phase disengagement for high-value platinum chloride solutions // *Chem. Eng. Sci. Elsevier*, 2015. Vol. 138. P. 827–833.
3. Samiei E., Tabrizian M., Hoorfar M. A review of digital microfluidics as portable platforms for lab-on-a-chip applications // *Lab Chip. Royal Society of Chemistry*, 2016. Vol. 16, № 13. P. 2376–2396.
4. Liu Y. et al. A review on emulsification via microfluidic processes // *Front. Chem. Sci. Eng.* 2020. Vol. 14, № 3. P. 350–364.
5. Klambauer G., Unterthiner T., Mayr A., Hochreiter S. Self-Normalizing Neural Networks // *31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*. 2017.

Работа поддержана РФФ (грант № 21-79-10307).

УДК 532.517

**ВИБРАЦИОННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СТРУЙНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ**

**Яковенко С.Н.**

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

Численно исследована струя, истекающая со скоростью  $U$  из отверстия в стенке диаметром  $D$ . Применен пакет OpenFOAM, в котором имплементирован активный способ управления – поперечная вибрация входного сечения (частотой  $f$ , амплитудой  $Z$ ) [1-3]. Как и в [2-5], получено расщепление струи (рис. 1) в широких диапазонах амплитуды ( $0,01 \leq Z/D \leq 1,00$ ), чисел Рейнольдса  $Re = UD/\nu > 50$ , Струхала  $St = fD/U$ .

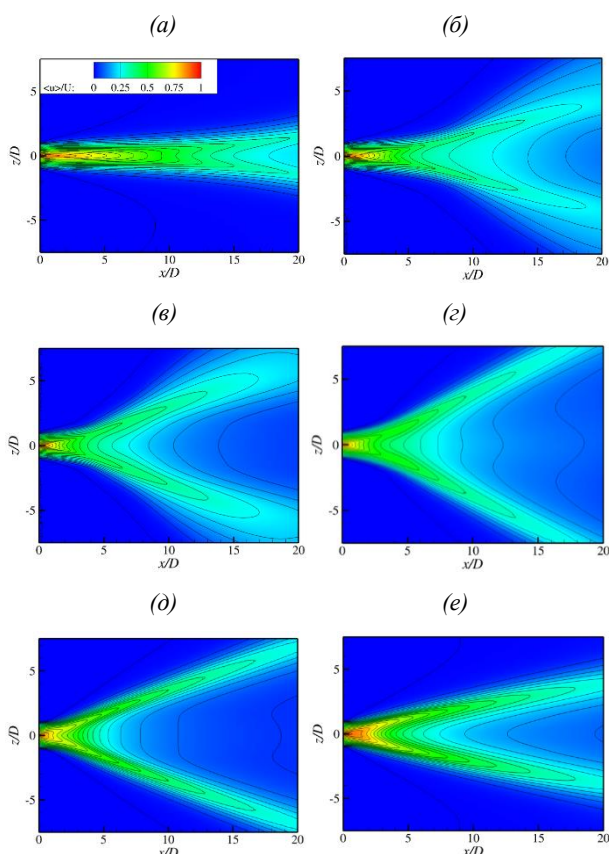


Рис. 1. Осредненная по большому периоду скорость  $\langle u \rangle / U$  в плоскости бифуркации струи ( $y=0, Z=0,5D, Re=250$ ) при  $St=0,01$  (а),  $0,025$  (б),  $0,05$  (в),  $0,1$  (г),  $0,2$  (д),  $0,5$  (е).

Для изучения влияния  $Z, Re, St$  по распределениям скорости оценена толщина  $d(x) = z(\langle u \rangle = \langle u \rangle_{\max})$  – расстояние в плоскости бифуркации от оси струи до точки, где осредненная по времени горизонтальная скорость  $\langle u \rangle$  равна максимуму в сечении  $x = \text{const}$ . Оценки угла расширения  $\alpha/2$  по кривой нарастания  $d(x)$  показывают его рост с увеличением числа  $Re$  [2], амплитуды  $Z$  и эффект насыщения после некоторых пороговых значений  $Z_{\text{sat}}$  (рис. 2). Результат указывает на возможность эффективного низкоамплитудного воздействия только при относительно больших  $Re$ . Выявлены оптимальные значения  $St_{\text{opt}}$ , соответствующие максимальным углам  $\alpha$  (рис. 3). При снижении  $Re$  растет пороговая амплитуда  $Z_{\text{sat}}$ , падает значение  $St_{\text{opt}}$ .

Также рассматривается импактная неизотермическая струя, натекающая на пластину, расположенную

на различных расстояниях вниз по потоку от входа. Результаты моделирования пассивного скаляра (температуры, концентрации) показывают расщепление струи с интенсификацией перемешивания и теплообмена под действием вибрационного возбуждения.

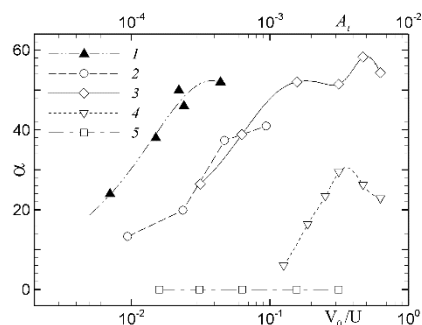


Рис. 2. Угол расширения  $\alpha$  в плоскости бифуркации как функция амплитуды  $A_i$  поперечной скорости, оцененной по интенсивности звука в [8] при  $Re=10^4$  и  $St=0,275$  (1), или амплитуды  $V_0/U$  скорости колебаний входного сечения в настоящих расчетах при  $Re=500$  и  $St=0,15$  (2),  $Re=250$  и  $St=0,1$  (3),  $Re=100$  и  $St=0,1$  (4),  $Re=50$  и  $St \leq 0,1$  (5).

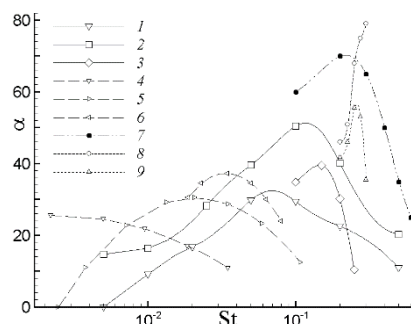


Рис. 3. Кривые  $\alpha(St)$  в настоящих расчетах при  $Re=100$  и  $Z=0,5D$  (1),  $Re=250$  и  $Z=0,5D$  (2),  $Re=500$  и  $Z=0,05D$  (3) с оценкой  $\alpha$  по  $d(x)$ ; в опытах [5] с оценкой  $\alpha$  по  $d(x)$  при  $Re=491$  (4),  $679$  (5),  $875$  (6), DNS при  $Re=10^3$  и  $V_0=0,15U$  с оценкой  $\alpha$  по изолиниям  $\langle u \rangle / U = 0,1$  (7), в опытах [4] при  $Re=3600$  с оценкой  $\alpha$  по внешним краям ветвей струи (8), в LES при  $Re=10^4$  и  $V_0=0,05U$  с оценкой  $\alpha$  по  $d(x)$  (9).

**Список литературы:**

1. Яковенко С.Н. Нестационарные численные решения для плоской струи, истекающей из узкой щели в затопленное пространство // Теплофиз. аэромех. 2019. Т. 26, № 5. С. 761–772.
2. 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.
3. Shevchenko A.K., Yakovenko S.N. Development of flow control methods in free and impinging jets // J. Phys. Conf. Ser. 2021. Vol. 2119. # 012003.
4. Reynolds W., Parekh D., Juvet P., Lee M. Bifurcating and blooming jets // Annu. Rev. Fluid Mech. 2003. Vol. 35. P. 295–315.
5. Кривокорытов 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.

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

УДК 621.9

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАПЛИ РАСПЛАВА С ВОДОЙ

Якуш С.Е.<sup>1</sup>, Сиваков Н.С.<sup>1,2</sup>, Мелихов В.И.<sup>1,3</sup>, Мелихов О.И.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
125430, Россия, Москва, пр. Вернадского, 101/1

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,  
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская, 5 к. 1

<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
111250, Россия, Москва, Красноказарменная, 14

Одной из актуальных проблем безопасности для атомной энергетики является изучение явления парового взрыва, который может произойти при тяжелых авариях на атомных реакторах вследствие взаимодействия между расплавом корнума, возникающим при плавлении активной зоны реактора, и водяным теплоносителем [1].

Важнейшей стадией парового взрыва является стадия предварительного перемешивания, в результате которой образуется взрывоопасная смесь крупных капель расплава (порядка 1 см), окруженных тонкой пленкой пара. В литературе было предложено несколько возможных механизмов фрагментации капель расплава, некоторые из них подтверждались проведением мелко-масштабных экспериментов, в частности, исследование взрыва одиночных капель [2] позволило рассматривать в качестве одного из основных гидродинамических механизмов, связанный с воздействием микро-масштабных струек воды на поверхность расплава.

Для описания трехфазной среды «расплав-вода-пар» с резкими границами между фазами применяется модель VOF (Volume of Fluid), реализованная в программной среде OpenFOAM [3] в виде оригинального решателя, учитывающего как сжимаемость всех фаз, так и процессы испарения-конденсации воды на межфазных границах.

В работе представлены результаты трехмерных расчетов взаимодействия капли горячего расплава с водой, рассматривались варианты как с покоящейся, так и с движущейся относительно воды каплей расплава. Схлопывание тонкой паровой пленки, окружающей каплю расплава, происходит за счет резкого роста давления окружающей жидкости.

Для вариантов с покоящейся каплей расплава наблюдается сферически симметричное схлопывание паровой пленки, обусловленное высокой разницей давлений между расплавом и водой. Схлопывание приводит к возникновению зон прямого контакта расплава с водой, что сопровождается ростом давления, вскипанием воды и утолщением паровой пленки. Возмущения расплава, обусловленные ударом воды по расплаву, приводят к формированию мелких струек, которые в дальнейшем фрагментируются на более мелкие частицы.

На рис. 1 изображена эволюция поверхности расплава, представленная изоповерхностью объемной доли расплава  $\alpha_m$ . Хорошо видны возникшие струйки расплава и мелкие фрагментированные частицы.

Стоит отметить, что полученная форма капли качественно согласуется с формами капель, полученными в результате эксперимента [2].

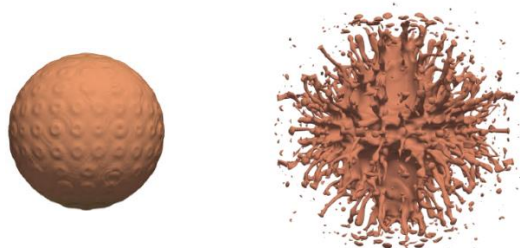


Рис. 1. Поверхность расплава покоящейся капли,  
 $\alpha_m = 0.2, t = 1, 800$  мкс.

Движение капли расплава относительно воды приводит к другому механизму взрыва капли – в результате повышения давления возникает струя воды, пробивающая каплю расплава по центру (рис. 2). Такое взаимодействие наблюдалось в работе [4]. Было рассмотрено несколько вариантов значений скорости капли и произведено сравнение получаемых площадей поверхности расплава и объемов пара.

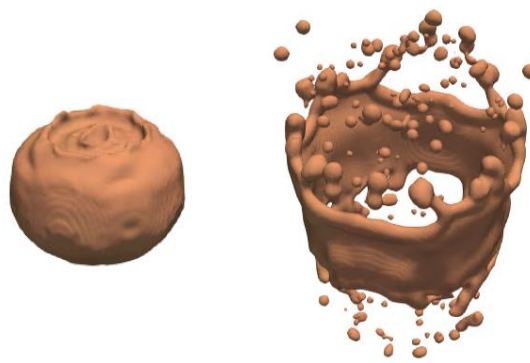


Рис. 2. Поверхность расплава движущейся капли,  
 $\alpha_m = 0.2, t = 0.1, 4$  мс.

Список литературы:

1. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Теплофизика и гидродинамика паровых взрывов. М.: ИПМех РАН, 2020. 276 с.
2. G. Ciccarelli, D.L. Frost. Fragmentation mechanisms based on single drop steam explosion experiments using flash X-ray radiography // Nucl. Eng. Des. 1994. V. 146. P. 109–132.
3. OpenFOAM. The open source CFD toolbox 2019 URL <https://www.openfoam.com>.
4. S. Thakre, W. Ma. 3D simulations of the hydrodynamic deformation of melt droplets in a water pool // Ann. of Nuc. En. 2015. V. 75. P. 123–131.

Работа поддержана РФФ  
(проект № 18-19-00289).

УДК 532.529

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕДОРАСШИРЕННЫХ СТРУЙ МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ И ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В.

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

При глубоком адиабатическом истечении газа в область пониженного давления (в пределе – в пустоту) из звукового либо сверхзвукового сопел возможна ситуация, когда давление на срезе сопла существенно, на порядки, превышает давление в окружающем пространстве. При дальнейшем расширении газа до давления в окружающем пространстве за срезом сопла возникает так называемая недорасширенная струя, при формировании которой существенным становится проявление эффектов вязкости, разреженности и неравновесности. Эти эффекты полностью определяются геометрическими характеристиками сопла, родом газа, температурами и давлениями в форкамере сопла и в окружающем пространстве. Наличие вязкости приводит к возникновению пограничного слоя на стенках сверхзвуковой части сопла, а также слое смешения вдоль границы струи. При этом режимы течения в струе за соплом могут меняться от турбулентного до свободно-молекулярного (рассеяния) в зависимости от определяющего числа Рейнольдса  $Re_L = Re^*/(N)^{1/2}$ , где  $Re^*$  – число Рейнольдса по параметрам в критическом сечении сопла, а  $N = P_0/p$  – отношение давления в сопла к окружающему. Согласно [1] при  $Re_L > 10^4$  режим течения в слое смешения носит турбулентный характер; при  $10^3 < Re_L < 10^2$  – ламинарный, и при  $Re_L < 10$  в струе происходит переход к режиму рассеяния с вырождением ударных волн по плотности (диска Маха и боковых скачков уплотнения).

Что касается роли неравновесных процессов в формировании недорасширенных струй малой плотности, то наиболее сильное влияние оказывают «энергоемкие» эффекты гомогенной конденсации и колебательной релаксации. Для примера на рис. 1 показано влияние гомогенной конденсации (температуры торможения) на число Маха на срезе сверхзвукового сопла и относительную плотность на оси струи.

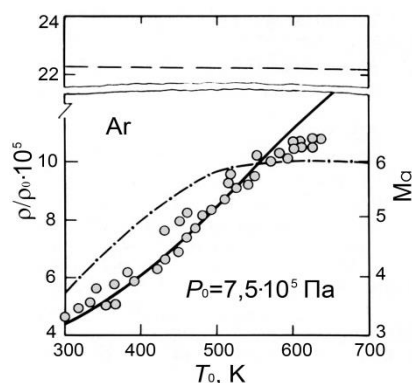


Рис. 1. Влияние конденсации на струю Ar.

Видно, что это влияние может быть очень существенным: для условий данного эксперимента относительная

плотность в струе примерно в 7 раз отличается от соответствующих изэнтропических значений, а число Маха на срезе сопла уменьшается примерно в 2 раза. Для молекулярных газов (например,  $CO_2$ ) кроме гомогенной конденсации на формирование течения в струе может оказывать влияние колебательная релаксация. При этом совместное влияние гомогенной конденсации и колебательной релаксации приводит к появлению максимума на зависимости относительной плотности от температуры торможения. Важно отметить, что в сверхзвуковой струе газа, расширяющегося в вакуум, достаточно легко создать любую неравновесность и условия для её «замораживания» для последующего анализа.

Кроме фундаментальных исследований кинетики неравновесных процессов недорасширенные струи малой плотности достаточно широко используются в различных вакуумных технологиях (получение ультрадисперсных, включая наноразмерные, новых материалов различного назначения, пленок, функциональных покрытий и т.д.). Другое практически важное направление исследований недорасширенных струй малой плотности связано с моделированием струй двигателей управления и ориентации (ДО) космических аппаратов (КА) и орбитальных станций (ОС). В настоящее время в качестве двигателей управления и ориентации КА и ОС используются жидкостных ракетные двигатели малой тяги, работающие на токсичных компонентах топлива с температурой сгорания около 3500 К, что ограничивает возможности натуральных испытаний ДО в вакуумных камерах. С точки зрения постановки исследовательских работ по моделированию работы ДО речь идет об истечении пристенной пленки жидкости со спутным газовым потоком из сверхзвукового сопла в вакуум. При этом определяющим является выбор параметром сопла и модельных жидкостей.

В докладе обсуждаются существующие подходы к моделированию струй ДО в вакуумных камерах; обосновывается подход, основанный на воспроизведении так называемого характерного угла расширения струй, интегрально учитывающего особенности и параметры струйного истечения газов в вакуум. Приведены примеры моделирования составных струй, а также струй ДО МКС. Исследования проведены на Вакуумном газодинамическом комплексе ИТ СО РАН, отнесенном к классу уникальных научных установок [2].

### Список литературы:

1. Авдеевский В.С., Иванов А.В., Карпман И.М. и др. Влияние вязкости в начальном участке сильно недорасширенных струй // Доклады Академии наук АН СССР, 1971, Т.197, №1, С.46-49.
2. [http://ckp-rf.ru/usu/200981/?sphrase\\_id=9066483](http://ckp-rf.ru/usu/200981/?sphrase_id=9066483)

УДК 532.529

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГАЗОВЫХ И ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ СТРУЙ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ В ВАКУУМ

Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В.

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

Обсуждаются возможности и ограничения электронно-пучковой и лазерной диагностики сверхзвуковых газовых и газочапельных струйных течений малой плотности. Основное внимание уделено методам измерения локальных параметров потока, в первую очередь плотности и визуализации общей структуры течения.

Основная идея метода электронного пучка состоит в анализе процессов, сопровождающий прохождение пучка быстрых электронов (с энергией порядка 20 кЭв) через исследуемую среду. Возбуждение энергетических уровней молекул и атомов, диссоциация, ионизация, рассеяние электронов на ядрах атомов, а также торможение их в кулоновском поле ядра приводит к появлению излучения в широком спектральном диапазоне – от инфракрасного до рентгеновского. Метод обладает хорошим пространственным разрешением (порядка 1 мм<sup>3</sup>) и позволяет определять такие параметры как плотность, парциальные концентрации компонентов, температуры внутренних степеней свободы и др., а также обеспечивает визуализацию структуры потока в выбранных сечениях. На рис. 1 показан пример визуализации недорасширенной струи Ar за звуковым соплом.

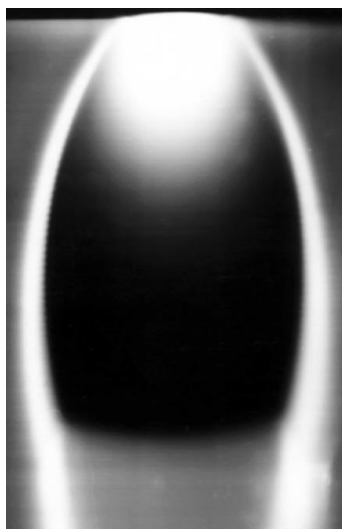


Рис. 1. Электронно-пучковая визуализация струи Ar за звуковым соплом в вакууме.

Поскольку при прохождении электронного пучка через исследуемую среду возбуждается и коротковолновая рентгеновская область спектра (тормозное и характеристическое рентгеновское излучение, не зависящее от температуры газа), то этот метод может применяться для диагностики высокотемпературных, включая плазменные, потоков малой плотности. Достаточно полную библиографию по электронно-пучковой диагностике можно найти в обзоре [1].

Обладея широкими возможностями для исследования газовых потоков, метод электронного пучка имеет и определенные ограничения, в частности при его применении верхний предел по концентрации (плотности) в локальных измерениях составляет величину порядка 10<sup>15</sup> см<sup>3</sup> для оптической области спектра и 10<sup>16</sup> – для рентгеновской. Кроме того, этот метод мало пригоден для визуализации газочапельных течений, часто встречающихся в практических приложениях, связанных, например, с работой дренажных устройств систем дозаправки топливом космических станций, двигателей ориентации космических аппаратов, сбросом отработанной воды в забортное пространство. Это обусловлено разрушением (дезинтеграцией) капель при взаимодействии с высокоэнергетичным электронным пучком.

Для визуализации газочапельных струйных течений малой плотности более подходящими являются лазерные методы, основанные на рассеянии зондирующего излучения на каплях. На рис. 2 на примере истечения пристенной пленки жидкости (этанола) со спутным газовым потоком (воздуха) из сверхзвукового сопла в вакуум представлена визуализация течения пленки и капель по методу «лазерного ножа».

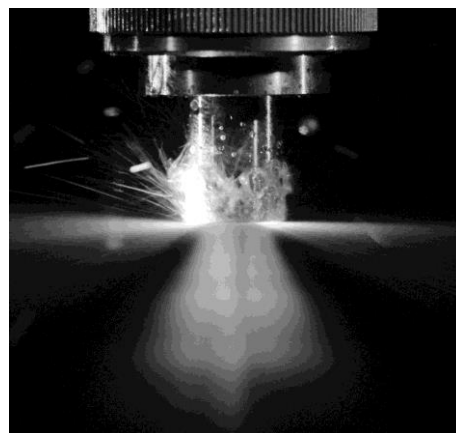


Рис. 2. Лазерная визуализация двухфазного потока (воздух-этанол) за звуковым соплом в вакууме.

Узкое поперечное сечение светового потока позволяет получать довольно полную информация о параметрах капель, движущихся в плоскости «лазерного ножа», таких как размеры, скорости и направления их разлета.

Исследования проведены на Вакуумном газодинамическом комплексе ИТ СО РАН, отнесенном к классу уникальных научных установок [2].

### Список литературы:

1. Gochberg L.A. The electron beam fluorescence technique in hypersonic aerothermodynamics // 18<sup>th</sup> AIAA Aerospace ground Testig conf. – AIAA-94-2635. – 1994. – 42 p.
2. [http://ckp-rf.ru/usu/200981/?sphrase\\_id=9066483](http://ckp-rf.ru/usu/200981/?sphrase_id=9066483)

**PUFFING AND MICRO-EXPLOSIONS IN COMPOSITE DROPLETS:  
SIMPLE MODELS OF COMPLEX PROCESSES**

**Sergei S. Sazhin**

Advanced Engineering Centre, School of Architecture, Technology and Engineering, University of Brighton, Brighton,  
BN2 4GJ, UK  
S.Sazhin@brighton.ac.uk

The most recent modelling results concerning the puffing/micro-explosion of water-fuel droplets are summarised. Assuming that the water sub-droplet is located exactly in the centre of the fuel droplet, the heat transfer and component diffusion equation inside the droplets were solved analytically. The analytical solution to these equations were obtained, implemented into the numerical code, and used at each time step of the calculations. The effects of thermal swelling and evaporation, using the Abramzon and Sirignano model, are considered. The radiative heating of the droplet is considered assuming that the droplet is semi-transparent. The effect of a supporting wire is taken into account assuming that heat supplied from the wire is distributed instantaneously and homogeneously throughout the whole droplet volume. The effect of relative movement between the droplet and gas is taken into account considering a non-self-consistent model, in which this effect on the Nusselt and Sherwood numbers was considered but not on the recirculation inside the droplet. The

predictions of the model based on the analytical solution to the heat transfer equation in a fuel-water droplet were verified by comparing them with the predictions of a numerical code for solving the same problem, in which this analytical solution is replaced with a numerical solution. The model based on the latter code was generalised to consider a shift of the water sub-droplet away from the centre of the fuel droplet. The values of times to puffing/micro-explosion were shown to decrease by less than 1% when the normalised shift (distance between the centres of the fuel droplet and water sub-droplet, divided by the maximal distance between these centres) increased from 0 (water droplet was located exactly in the centre of the fuel droplet) to 20%. This justifies the applicability of the earlier developed model, in which the water sub-droplet is located exactly in the centre of the fuel droplet, to most engineering applications.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А., Козловский Ю.М.</b> Плотность и тепловое расширение сплавов магний–кальций.....	1
<b>Агафонцев М.В., Луценко А.В., Лобода Е.Л., Рейно В.В.</b> Исследование процессов горения при наличии внешнего источника пульсаций давления .....	2
<b>Алексеев С.В., Романов К.В., Романов Д.В., Романов В.А., Степанов Е.А., Майоров А.О., Лебедев А.А.</b> Теплофизический механизм зарождения солнечных пятен на фотосферном уровне солнца .....	3
<b>Алифанов О.М., Викулов А.Г., Будник С.А., Ненарокомов А.В., Титов Д.М., Моржухина А.В.</b> Идентификации математических моделей теплопереноса в втеп катушках.....	4
<b>Алпацкий Н.С., Павленко А.М., Занин Б.Ю., Мельник Е.А., Каприлевская В.С.</b> Вихревая структура обтекания трапециевидной модели БПЛА в зависимости от геометрических размеров и углов отклонения органов управления .....	5
<b>Андрющенко В.А.</b> Изучение распределения заряда вблизи одностенных углеродных нанотрубок .....	6
<b>Антонов Д.В., Castanet G., Сажин С.С., Стрижак П.А.</b> Численное моделирование теплопереноса в двухжидкостных каплях в условиях естественной и вынужденной конвекции .....	7
<b>Аньшакон А.С., Алиферов А.И., Домаров П.В., Урбах А.Э.</b> Изготовление электронагревателя плазменным напылением порошковых материалов .....	8
<b>Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С.</b> Экспериментальное исследование коэффициента аэродинамического сопротивления твердой сферы в неизотермических условиях .....	9
<b>Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С.</b> Влияние внешнего воздушного потока на закономерности осаждения и испарения монодисперсного кластера капель .....	10
<b>Архипов В.А., Волков С.А., Золоторёв Н.Н.</b> Отработка методики исследования акустической проводимости твердого ракетного топлива.....	11
<b>Архипов Д.Г., Хабахпашев Г.А.</b> Нелинейное эволюционное уравнение для пространственных возмущений поверхности раздела двухслойного течения жидкостей в наклонном канале .....	12
<b>Астанина М.С., Шеремет М.А.</b> Влияние материала рёбер радиатора на естественную конвекцию жидкости переменной вязкости в полости с тепловыделяющим элементом .....	13
<b>Афанасьев А.А.</b> Утилизация парниковых газов водонасыщенных пластах. Некоторые задачи термогидродинамического моделирования.....	14
<b>Балакин Д.Ю., Аронсон К.Э., Демидов А.Л.</b> Разработка эжекторов для систем подогрева сетевой воды паровых турбин .....	15
<b>Балобанов Н.А.</b> Численное моделирование теплообмена в системах нагрева с резистивными элементами.....	16
<b>Баранова Т.А., Жукова Ю.В., Кухарчук И.Г., Чорный А.Д.</b> Теплогидравлическое состояние элементов оборудования реакторной установки типа ВВЭР-1200 для стационарного режима эксплуатации .....	17
<b>Барановский Н.В., Вяткина В.А.</b> Математическое моделирование процесса пиролиза листа березы при высокотемпературном воздействии верхового лесного пожара .....	18
<b>Барсуков А.В., Терехов В.В., Терехов В.И.</b> Rans моделирование отрывного турбулентного потока в плоском канале с оребренной стенкой.....	19
<b>Барткус Г.В., Ковалев А.В., Ягодницына А.А.</b> Влияние внешних низкочастотных пульсаций расхода жидкости на газожидкостное течение в прямоугольном микроканале .....	20
<b>Барткус Г.В., Кузнецов В.В.</b> Исследование волновых характеристик кольцевого газожидкостного течения в прямоугольном микроканале.....	21
<b>Батрак Н.В., Копалейшвили Н.Г., Кузенов В.В., Рыжков С.В.</b> Исследование теплофизических процессов формирования потоков частиц и излучения высокой мощности в плазме с сильным магнитным полем .....	22
<b>Беденко Д.В., Ковалев О.Б., Сергачев Д.В.</b> Численное исследование газопорошковых течений при высоких концентрациях частиц в коаксиальной лазерной наплавке .....	23
<b>Белавина Е.А., Пятницкая Н.Ю.</b> Исследование естественной конвекции на примере имитаторов расплава солей .....	24
<b>Белослудцев В.В., Зайцев Д.В.</b> Кипение воды и растворов ионных жидкостей в микро- и миниканалах при неоднородном нагреве со стороны стенки.....	25
<b>Беляев А.В., Сидельников Н.Е., Дедов А.В.</b> Экспериментальное исследование теплообмена при кипении в миниканале с модифицированной поверхностью .....	26
<b>Бердников В.С., Винокуров В.А., Винокуров В.В.</b> Численное и физическое моделирование течения расплава с числом Прандтля $Pr=40$ и теплообмена в методе Чохральского.....	27
<b>Бобров М.С., Хребтов М.Ю.</b> Моделирование распространения дисперсных примесей от цементного завода Лагранжевым методом.....	28
<b>Божеева Д.М., Кузнецов В.А., Дектерев А.А.</b> Исследование влияния режимных параметров на процессы кислородной газификации пылеугольного топлива .....	29
<b>Бойко А.В., Бородулин В. И., Иванов А. В., Мищенко Д. А.</b> Определение границ области перехода к турбулентности в пограничном слое с помощью видеосъёмки в инфракрасном диапазоне.....	30
<b>Бойко Е.В., Пильник А.А., Смовж Д.В.</b> Модель термоакустики для поликристаллического графенового покрытия .....	31

<b>Бондарева Н.С., Шеремет М.А.</b> Интенсификация теплообмена и фазовых превращений с использованием высокотеплопроводных пористых вставок .....	32
<b>Борзенко Е.И., Шрагер Г.Р.</b> Исследование потока отверждающейся жидкости в случае заполнения плоского канала .....	33
<b>Борискин А.А., Васильев А.А.</b> Возбуждение цилиндрической детонации за ослабевающими ударными волнами.....	34
<b>Борисов Б.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А.</b> Численный анализ влияния месторасположения областей ввода и вывода системы воздухообмена на тепловой режим рабочей зоны в помещении с газовым инфракрасным излучателем .....	35
<b>Бородулин В.И., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.</b> Восприимчивость пограничного слоя скользящего крыла к локализованным неоднородностям поверхности при возбуждении мод поперечного течения .....	36
<b>Бородулин В.И., Иванов А.В., Качанов Ю.С., Мищенко Д.А.</b> Восприимчивость пограничного слоя скользящего крыла к локализованным неоднородностям поверхности при возбуждении мод поперечного течения .....	37
<b>Бусов К.А., Мажейко Н.А.</b> Исследование свободной струи вскипающей воды.....	38
<b>Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.</b> Непрерывное детонационное сжигание авиационного керосина в воздухе в вихревой радиальной камере .....	39
<b>Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.</b> Непрерывная многофронтная детонация водокеросиновой эмульсии с нагретым воздухом .....	40
<b>Васильев М.М., Шухов Ю.Г., Терехов В.В., Старинский С.В.</b> Динамика смачивания при падении капель воды на лазернотекстурированную поверхность с бифильными свойствами смачивания .....	41
<b>Васнев И.Р., Федорова Н.Н., Гольдфельд М.А.</b> Влияние входных условий на тепловые режимы сверхзвукового течения в модельном канале .....	42
<b>Вершинина Ю.В., Прохоров С.В.</b> Расчет коэффициента гидравлического сопротивления модели тепловыделяющей сборки с микротрещинами .....	43
<b>Владимиров В. Ю., Чиннов Е.А., Хмель С.Я.</b> Интенсификация теплообмена при кипении на текстурированных бифильных поверхностях .....	44
<b>Вожяков И.С., Хребтов М.Ю., Мулляджанов Р.И.</b> Численное моделирование распыла закрученной струи .....	45
<b>Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н.</b> Комбинирование микроструктурированной поверхности и сеточного покрытия для интенсификации теплообмена в стекающих пленках смеси фреонов .....	46
<b>Вострецов С.О., Ягодница А.А., Ковалев А.В., Бильский А.В.</b> Исследование массообмена при двухфазном течении несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа с помощью метода micro-LIF.....	47
<b>Гаврилов А.А.</b> Прямое численное моделирование турбулентных течений упруго-вязкопластических жидкостей в трубе .....	48
<b>Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Сентябов А.В.</b> Численное моделирование турбулентного обтекания круглого цилиндра при числе Рейнольдса $Re=140\ 000$ методами PANS и URANS на основе модели $k-\varepsilon-\zeta-a$ .....	49
<b>Гармаев С.С., Бернар А., Мулляджанов Р.И., Яковенко С.Н.</b> Применение методов машинного обучения к моделированию турбулентности .....	50
<b>Гатапова Е.Я., Граур И.А., Батуева М.А., Вольф М.</b> Неравновесные процессы испарения и конденсации .....	51
<b>Гешев П.И.</b> Новая система уравнений для турбулентно-волновой пленки жидкости .....	52
<b>Гибанов Н.С., Шеремет М.А.</b> Моделирование сопряженного конвективно-радиационного теплопереноса в герметичных блоках с прямоугольными нагревателями объемного тепловыделения.....	53
<b>Голых Р.Н., Хмель В.Н., Минаков В.Д., Барсуков А.Р., Шакура В.А., Маняхин И.А., Ильченко Д.А.</b> Численная модель реструктуризации молекул олигомеров под действием механических колебательных возмущений.....	54
<b>Горбачев М.В., Макаров М.С., Терехов В.И., Сюзаев А.И.</b> Экспериментальное исследование процесса испарения водно-этаноловой смеси с модифицированной и капиллярно-пористой поверхности в поток сухого воздуха .....	55
<b>Гордиенко М.Р., Кабардин И.К., Какаулин С.В., Правдина М.Х., Полякова В.И., Зезюлин И.В., Яворский Н.И.</b> Развитие метода измерения внутри трубы Ранка с помощью термисторов.....	56
<b>Гордин С.А., Соснин А.А., Журавлев Д.О., Хряпченко К.Д.</b> Решение обратной задачи определения параметров теплопереноса при установившихся режимах работы изолированной системы теплоснабжения .....	57
<b>Гореликова А.Е., Кашинский О.Н., Чинак А.В.</b> Влияние угла наклона на распределение диаметров газовых пузырей в неподвижной жидкости в наклонной трубе .....	58
<b>Грекова А.Д., Кривошеева И.О., Лысиков А.И., Токарев М.М.</b> Трехпериодические поверхности Шварца как перспективные геометрии для теплообменников .....	59
<b>Губин В.Е., Болатова Ж., Пак А.А., Мамонтов Г.Я.</b> Комплексная переработка низкосортного угля .....	60
<b>Гудько А.С., Гелаш А.А., Мулляджанов Р.И.</b> Метод обратной задачи рассеяния уравнения КдФ: большой волновой пакет .....	61



<b>Гузанов В.В., Бобылев А.В., Квон А.З.</b> Экспериментальное исследование особенностей перехода к трёхмерному волновому движению при наклонном течении пленки жидкости.....	62
<b>Давыдов М.Н., Чернов А.А., Пильник А.А., Лежнин С.И.</b> Влияние эффекта бародиффузии на динамику газового пузырька в магматическом расплаве.....	63
<b>Дедов А.В.</b> Исследование интенсификации двухфазного теплообмена в задачах кипения в большом объеме, микрочаналах, спрейном охлаждении.....	64
<b>Дектерев А.А., Кузнецов В.А., Тэпфер Е.С.</b> Моделирование шлакования поверхностей нагрева топочной камеры с четырехвихревой схемой сжигания пылеугольного топлива.....	65
<b>Дектерев Ар.А., Дектерев А.А., Дектерев Д.А.</b> Пиксельная аэродинамическая труба.....	66
<b>Дектерев Д.А., Дектерев Ар.А., Дектерев А.А., Лобасов А.С., Платонов Д.В., Необъявляющий П.А., Вавилов Д.В., Сентябов А.В.</b> Методы и подходы в исследовании циклоидальных роторов.....	67
<b>Дементьев Ю.А., Роньшин Ф.В., Чиннов Е.А.</b> Экспериментальное исследование теплообмена при двухфазном течении диэлектрической жидкости и парогазовой смеси в плоском микроканале.....	68
<b>Демидов А.Л., Рябчиков А.Ю.</b> Расчетные и экспериментальные исследования распределения пара в трубных пучках конденсаторов паровых турбин.....	69
<b>Демидов А.С., Варава А.Н., Дедов А.В., Захаренков А.В., Комов А.Т.</b> Охлаждение модели диверторного модуля диспергированным потоком теплоносителя при одностороннем нагреве.....	70
<b>Деревич И.В., Клочков А.К.</b> Тепловой взрыв одиночных частиц в неизотермической турбулентности.....	71
<b>Держо О.Г.</b> Стационарные волны большой амплитуды в стратифицированном по плотности сдвиговом течении.....	72
<b>Деринг Е.Д., Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С.</b> Дифференциальные сечения рассеяния малых кластеров.....	73
<b>Димов С.В., Пуховой М.В., Сибиряков Н.Е., Кабов О.А.</b> Экспериментальное исследование теплообмена при газо-спрейном охлаждении.....	74
<b>Димов С.В., Гасенко О.А.</b> Паровая конверсия метана в микроканальном реакторе.....	75
<b>Добросельский К.Г.</b> Особенности течения и взаимодействия вертикальных струй в поперечном потоке при малых относительных скоростях.....	76
<b>Дорохов В.В., Антонов Д.В., Няшина Г.С., Стрижак П.А.</b> Характеристики термического разложения перспективных жидких биотоплив.....	77
<b>Дрожжин А.П., Громов К.О.</b> Многоочаговое воспламенение горючих пен.....	78
<b>Дулин М.Н.</b> Обнаружение фермионных возбуждений электронов в атомах при тепловом расширении твёрдых тел.....	79
<b>Дутова О.С., Мешалкин А.Б.</b> Малопараметрическое уравнение для расчета коэффициента вязкости кислорода в жидкости, газе и флюиде.....	80
<b>Евдокименко И.А., Лобанов П.Д.</b> Гидродинамическая структура двухфазного пузырькового потока при малом увеличении сечения плоского вертикального канала.....	81
<b>Егошина О.В., Звонарева С.К.</b> Исследование влияния давления на представительность пробы при отборе пара различными типами пробоотборных устройств.....	82
<b>Елистратов С.Л., Миронова Н.В.</b> Моделирование кризиса кипения водно-солевых растворов внутри вертикального цилиндрического нагревателя.....	83
<b>Жеребятъев В.И.</b> О физической сути теплопроводности сред.....	84
<b>Жерибор М.О., Хребтов М.Ю.</b> Сравнение распада закрученной струи жидкости для различных чисел Рейнольдса.....	85
<b>Жуков В.Е., Мезенцева Н.Н., Павленко А.Н.</b> Теплоотдача при кипении на модифицированной поверхности во фреоне R21 и смеси фреонов R114/R21.....	86
<b>Зайнуллина Э.Р., Митяков В.Ю.</b> Теплообмен при конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе.....	87
<b>Замураев В.П., Калинина А.П.</b> Горение в сверхзвуковом потоке с $M=1.7$ под действием при управлении теплогазодинамическими импульсами.....	88
<b>Занегин С.Ю., Зубко В.В., Иванов Н.С., Ковалев К.Л.</b> Исследование гистерезиса при кипении жидкого азота на поверхности ВТСП лент.....	89
<b>Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Кочергин А.В.</b> Экспериментальное исследование влияния различных газов на уровень звукового давления в стоячей волне в жидкости до и после подачи газа.....	90
<b>Захаров Ю.А., Гоц С.С., Бахтизин Р.З., Шарипов Т.И.</b> Экспериментальное исследование динамики деградиционных процессов в вольфрамовых нитях накала.....	91
<b>Зонов А.С., Фандеев А.С., Киндра В.О.</b> Численное исследование теплогидравлических характеристик конфузорно-диффузорных каналов.....	92
<b>Иващенко В.А., Токарев М.П., Мулляджанов Р.И.</b> Численное исследование эффективности жидкометаллических теплоносителей.....	93
<b>Иващенко Е.И., Козюлин Н.Н., Хребтов М.Ю., Мулляджанов Р.И.</b> Управление кавитационным объектом гидрокрыла посредством тангенциальной подачи жидкости.....	94
<b>Исаев С.А., Никущенко Д.А.</b> Интенсификация теплообмена на структурированных многорядными наклонными канавками поверхностях прямых и изогнутых каналов.....	95

<b>Исупов М.В.</b> Газоразрядный источник УФ излучения на основе низкочастотного индукционного разряда в парах кадмия .....	96
<b>Кабов О.А., Золотарев К.В., Зубавичус Я.В., Винокуров В.В., Винокуров В.А., Фиников К.А., Пуховой М.В., Быковская Е.Ф., Кочкин Д.Ю., Роньшин Ф.В., Мунгалов А.С., Димов С.В., Марчук И.В.</b> Расчет охлаждения тепло-нагруженных устройств рабочих станций строящегося сибирского кольцевого источника фотонов .....	97
<b>Какаулин С.В., Кабардин И. К., Гордиенко М.Р.</b> Исследование процессов образования наледи на модели лопасти ветрогенератора.....	98
<b>Каприлевская В.С., Павленко А.М., Катасонов М.М., Козлов В.В.</b> Исследование эффективности распределенного отсоса на течении за цилиндрическим трехмерным элементом шероховатости на модели прямого крыла .....	99
<b>Карелин В.А., Саломатов Вл.В.</b> Нелинейная модель переноса тепла в слое диэлектрика при СВЧ-облучении.....	100
<b>Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Воробьев М.А.</b> Пульсационная структура напряжения трения на стенке в турбулентном течении в кольцевых каналах .....	101
<b>Кашкарова М.В., Кравцова А.Ю.</b> Исследование картины течения в Т-микроканале при различных параметрах течения .....	102
<b>Кашковский А.В., Кудрявцев А.Н., Шершнев А.А.</b> Численное исследование структуры недорасширенных сверхзвуковых струй разреженного газа методом прямого статистического моделирования.....	103
<b>Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А., Непогодина Ю.М., Бородин А.В.</b> Гидродинамика и теплообмен термохимических плюмов, не вышедших на поверхность и ответственных за образование хребтов и поднятий .....	104
<b>Кириченко Е.О., Кириченко Д.П., Зайцев Д.В., Кабов О.А.</b> Исследование полета микрокапель жидкости над линией контакта в горизонтальной пленке жидкости, нагреваемой снизу .....	105
<b>Киселев С.П., Киселев В.П.</b> Соударение микрочастицы алюминия с преградой из титана при условиях ХГН .....	106
<b>Кислицын С.А., Бердников В.С.</b> Влияние нестационарной конвекции на формы фронтов кристаллизации в методах направленной кристаллизации.....	107
<b>Кислицын С.А., Михайлов А.В., Золотухина О.С.</b> Влияние высоты слоя воды на формы фронта кристаллизации льда при охлаждении вертикальной стенки полости .....	108
<b>Клюев А.Ю., Гурьянов А.И.</b> Изучение особенностей горения диффузионной метановоздушной смеси на разных пространственных масштабах .....	109
<b>Князева А.Г., Анисимова М.А.</b> Двухуровневая связанная модель управляемого синтеза композита.....	110
<b>Князева А.Г., Букрина Н.В.</b> Моделирование иницирования реакции в порошковой прессовке с поверхности с выделением эквивалентной реакционной ячейки.....	111
<b>Ковалев А.В., Ягодницына А.А., Бильский А.В.</b> Влияние вязкости фаз на динамический контактный угол смачивания в микроканальных потоках жидкость-жидкость .....	112
<b>Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Генералов Д.А., Бусыгин С.В., Карпов Д.А.</b> Математическое моделирование повышения эффективности сжигания комбинированного топлива.....	113
<b>Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Чукалин А.В., Петров А.В.</b> Исследование динамики ветра в приземном пограничном слое над водоемом .....	114
<b>Козлов В.В., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Тамбовцев А.С., Шмаков А.Г.</b> Исследование взаимодействия микроструй водорода в процессе диффузионного горения .....	115
<b>Козлов С.А., Томилов С.Н., Поддубный И.И., Лешуков А.Ю., Свириденко М.Н., Данилов И.В., Путрик А.Б.</b> Расчет полей температур энергонапряженных компонентов панели первой стенки модуля №7 тип А бланкета ИТЭР.....	116
<b>Козловский Ю.М., Станкус С.В.</b> Термический коэффициент линейного расширения галлиевых гранатов ГГГ, ГСГГ и КНГГ .....	117
<b>Козюлин Н.Н., Хребтов М.Ю.</b> Эффект гармонической модуляции потока в тепловой завесе над плоской пластиной.....	118
<b>Кокорин А.В., Назаров А.Д., Серов А.Ф.</b> Испарение капель наножидкости на подложке .....	119
<b>Колесников Б.П., Арушанян Р.Р.</b> Перколяционный подход к моделированию эффективных кинетических коэффициентов переноса в пористых средах.....	120
<b>Коновалов Д.А., Кожухов Н.Н., Ряжских В.И.</b> Однофазный конвективный теплообмен в каналах энергетических установок, заполненных анизотропной пористой средой .....	121
<b>Копьев Е.П., Садкин И.С., Шадрин Е.Ю., Мухина М.А.</b> Характеристики сжигания жидкого топлива с добавлением наночастиц алюминия в распылительном горелочном устройстве .....	122
<b>Коробков С.В., Гныря А.И., Терехов В.И.</b> Экспериментальные исследования влияния ветровых нагрузок на аэродинамику группы моделей зданий призматической формы.....	123
<b>Кочкин Д.Ю., Мунгалов А.С., Деревянников И.А., Марчук И.В.</b> Динамика парогазового пузыря под нагреваемой подложкой.....	124
<b>Кудров А.И., Шермет М.А.</b> Численное моделирование естественной конвекции кориума с учетом переменного тепловыделения и переменной вязкости.....	125

<b>Кузнецов А.В.</b> Создание и исследование композитного порошкового топлива уголь-опилки .....	126
<b>Кузнецов В.В.</b> Теплофизика фазовых и химических превращений на малых и сверхмалых масштабах. Фундаментальные исследования и практические приложения .....	127
<b>Кузнецов Д.В., Павленко А.Н.</b> Теплообмен при кипении азота на модифицированных методом микродугового оксидирования поверхностях .....	128
<b>Кузнецов В.А., Божеева Д.М., Дектерев А.А.</b> Исследование процессов кислородного сжигания пылеугольного топлива в опытно-промышленном котле .....	129
<b>Кузнецов В.В.</b> Многомасштабная гидродинамика при вытеснении нефти с различной вязкостью водой в слоисто-неоднородной пористой среде .....	130
<b>Кузнецов В.В., Гасенко О.А.</b> Особенности тепловых процессов при производстве водорода в микроструктурном реакторе-теплообменнике .....	131
<b>Кузнецов Г.В., Копылов Н.П., Кропотова С.С., Жданова А.О., Стрижак П.А.</b> Изучение состава продуктов горения материалов .....	132
<b>Кундашкин А.Д., Палкин Е.В., Хребтов М.Ю., Мулляджанов Р.И.</b> Моделирование турбулентного газового кольцевого горения методом крупных вихрей и флеймлетов .....	133
<b>Лабусов С.В., Лукашов В.В., Тупикин А.В.</b> Распределение радикала OH в обращённом диффузионном пламени водорода .....	134
<b>Ласковец Е.В.</b> Моделирование трехслойных течений в горизонтальном канале с учетом испарения на основе точных решений .....	135
<b>Лебедев А.С., Сорокин М.И.</b> Управление отрывом потока за цилиндром с использованием пульсирующей струи .....	136
<b>Левин А.А., Хан П.В., Сафаров А.С.</b> Численная модель парового пузырька на плоской теплоотдающей стенке с быстро растущей температурой .....	137
<b>Леманов В.В., Лобасов А.С., Шаров К.А., Лукашов В.В.</b> OH визуализация диффузионного факела пропана .....	138
<b>Литвинцев К.Ю., Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Дектерев Д.А., Захаринский Ю.Н., Мешкова В.Д., Минаков А.В., Филимонов С.А., Финников К.А.</b> Разработка снегозащитных систем на основе моделирования снегопереноса .....	139
<b>Литвинцева А.А., Вожаков И.С., Чеверда В.В.</b> Экспериментальное исследование пульсационной тепловой трубы .....	140
<b>Лобасов А.С., Минаков А.В.</b> Численное исследование влияния формы текстуры поверхности, содержащей капиллярно удержанный воздух, и краевого угла смачивания на перепад давлений в текстурированном микроканале .....	141
<b>Лобасов А.С., Минаков А.В., Пряжников М.И.</b> Экспериментальные исследования межфазного натяжения и краевого угла смачивания между нефтью и наносuspензией силиказоли .....	142
<b>Лобасов А.С., Скрипкин С.Г., Цой М.А., Кравцова А.Ю.</b> Кавитация за цилиндром, расположенном в микроканале: моделирование и эксперимент .....	143
<b>Лобода Е.Л.</b> Применение методов ИК термографии для исследования процессов горения .....	144
<b>Лобода Е.Л., Лобода Ю.А., Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Рейно В.В.</b> Исследование природных пожаров и их влияния на атмосферу .....	145
<b>Лоенко Д.С., Шеремет М.А.</b> Влияние материала наночастиц на термогравитационную конвекцию псевдопластичной наножидкости в полости с теплопроводной подложкой и источником переменного тепловыделения .....	146
<b>Локотко А.В.</b> Газотурбинный струйный двигатель .....	147
<b>Лопато А.И.</b> Математическое моделирование инициирования детонационных волн при отражении ударной волны от профилированного торца канала .....	148
<b>Лукьянов А.А., Зарипов Д.И.</b> Экспериментальное исследование обратного пристенного течения в конфузоре и диффузоре .....	149
<b>Лукьянов Ан.А., Алексеев М.В.</b> Исследование структуры межфазной поверхности стационарного снаряда Тейлора .....	150
<b>Луценко А.В., Лобода Е.Л., Агафонцев М.В.</b> Исследование турбулентности в пламени с применением методов ИК-термографии .....	151
<b>Лэ С.Х.К., Шеремет М.А.</b> Особенности теплообмена в кубической полости при наличии пористых ребер .....	152
<b>Майоров В.О., Ястребов А.К., Левашов В.Ю.</b> Моделирование вскипания жидкости в волне разрежения .....	153
<b>Мальцев Л.И., Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Калтаев А.Ж.</b> Влияние кавитационной обработки на реологические свойства и характеристики распыления водоугольных суспензий с добавлением пирогенетической жидкости .....	154
<b>Марчук И.В., Бараховская Э.В.</b> Конденсатор для применения в условиях микрогравитации .....	155
<b>Маслеников Г.Е., Саманов Н.А., Никитин А.Д., Осипов П.В., Рыжков А.Ф.</b> О влиянии теплофизических характеристик реагентов на точность определения кинетических параметров .....	156
<b>Мацкевич Н.И., Семерикова А.Н., Самошкин Д.А., Станкус С.В., Трифонов В.А., Лукьянова С.А., Шлегель В.Н., Кузнецов В.А.</b> Монокристалл цезий-литиевого молибдата: энтальпия решетки, теплоемкость, корреляции «термодинамика-функциональные свойства» .....	157

<b>Мацкевич Н.И., Семерикова А.Н., Ткачев Е.Н., Зайцев В.П., Мацкевич М.Ю., Ануфриева О.И.</b> Термодинамические характеристики замещенного гольмием висмут-кобальтового оксида.....	158
<b>Мелких А.В., Скрипов П.В.</b> Теплоперенос в не вполне устойчивых и неустойчивых жидкостях: моделирование и эксперимент .....	159
<b>Мельник А.В., Богословцева А.А., Сафонов А.И.</b> Сепарация эмульсий воды и нефтепродуктов на гидрофобных мембранах.....	160
<b>Мельник Е.А., Павленко А.М., Занин Б.Ю., Алпацкий Н.С., Каприлевская В.С.</b> Исследование влияния органов управления на вихревую структуру обтекания модели БПЛА классической компоновки с фюзеляжем .....	161
<b>Меркулова И.Е., Замчий А.О., Лунев Н.А., Константинов В.О., Баранов Е.А.</b> Влияние параметров синтеза и отжига на размер зерна тонкой пленки поликристаллического алюминия.....	162
<b>Мешкова В.Д., Дектерев А.А., Шульженко П.Д., Филимонов С.А., Литвинцев К.Ю.</b> Исследование влияния высотности здания на размеры формирования ветровых зон.....	163
<b>Миськив Н.Б., Мамонов В.Н., Назаров А.Д., Серов А.Ф.</b> Особенности структуры течения в коаксиальных кольцевых потоках Куэтта – Тейлора .....	164
<b>Митин К.А., Бердников В.С., Митина А.В.</b> Влияние граничных условий на верхней границе слоя жидкости в модели топливного бака на сопряженный теплообмен в режиме нестационарной тепловой гравитационно-капиллярной конвекции .....	165
<b>Митин К.А., Бердников В.С., Митина А.В.</b> Влияние теплопроводности и длины кристалла на сопряженный теплообмен кристалла с окружающей средой в методе Чохральского .....	166
<b>Михайленко С.А., Шеремет М.А.</b> Особенности конвективного теплопереноса в замкнутой вращающейся полости при наличии тепловыделяющего элемента и реберной структуры .....	167
<b>Михайлов А.В., Зайцев Д.В., Гришков В.А., Никитин А.А., Кабов О.А.</b> Исследования конденсации пара на поверхности с контрастной смачиваемостью .....	168
<b>Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.</b> Влияние состава газозвеси угольной пыли на скорость распространения пламени в цилиндрическом канале .....	169
<b>Моисеева К.М., Порязов В.А., Крайнов А.Ю.</b> Численное моделирование влияния поперечных акустических колебаний в цилиндрическом канале заряда из пороха Н на скорость горения .....	170
<b>Морозов А.А., Титарев В.А.</b> Динамика плоского разлета газа при наносекундном лазерном испарении в газ низкого давления.....	171
<b>Мунгалов А.С., Кочкин Д.Ю.</b> Численное исследование деформаций свободной поверхности в тонком слое жидкости, неоднородно нагреваемом со стороны подложки .....	172
<b>Назаров А.Д., Серов А.Ф., Миськив Н.Б., Мамонов В.Н.</b> Влияние импактного воздушного потока на параметры охлаждающей пленки жидкости .....	173
<b>Назаров Н.А., Пахомов М.А., Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.И.</b> Аэродинамика и тепловая эффективность пристенной газовой завесы, вдуваемой через наклонные отверстия в поперечную траншею .....	174
<b>Насырбаев А.</b> Термический анализ нанодисперсного кубического карбида вольфрама, синтезированного плазмодинамическим методом .....	175
<b>Насырбаев А., Никитин Д.С.</b> Исследование теплофизических характеристик керамики на основе кубического карбида кремния.....	176
<b>Наумов И.В., Шарифуллин Б.Р., Штерн В.Н.</b> Исследование вихревых течений на границе раздела двух несмешивающихся жидкостей .....	177
<b>Нигматулин Б.И., Пивоваров В.А.</b> Ядерные энергетические установки с тяжелыми металлическими теплоносителями .....	178
<b>Низовцев М.И., Стерлягов А.Н.</b> Экспериментальное исследование влияния вдува воздуха при испарении капель воды на пористых поверхностях.....	180
<b>Низовцев М.И., Стерлягов А.Н.</b> Влияние паропроницаемости наружной облицовки и барьерного слоя на увлажнение материалов фасада здания.....	181
<b>Николаева А.В., Астахов В.В., Литышев А.В., Пантюшин С.И.</b> Разработка эмпирической корреляции для оценки коэффициента конверсии при паровом взрыве в условиях протекания тяжелой аварии .....	182
<b>Николаева А.В., Литышев А.В., Пантюшин С.И.</b> Валидация CFD моделей турбулентного смешения в приложении к водородной безопасности .....	183
<b>Николаева А.В., Чуркин А.Н., Шебанова О.В., Пантюшин С.И.</b> Моделирование теплообменных процессов в вертикальных каналах, охлаждаемых водой СКД.....	184
<b>Никулин Б.И., Поддубный И.И., Свириденко М.Н., Данилов И.В.</b> Оценка температурного поля в сборке опоры внутреннего бланкета ИТЭР при разрушении электроизоляционного покрытия .....	185
<b>Носков А.С., Фальков А.А., Лукьянов В.Е.</b> Верификация и использование CFD-кода при анализе гидродинамики и теплообмена в активных зонах типа ВВЭР.....	186
<b>Носкова К.Р., Гурьянов А.И., Гурьянова М.М.</b> Влияние несимметричного профиля скорости за компрессором на газодинамику камеры сгорания ГТД.....	187
<b>Огородников И.А.</b> Трансформация резонансных солитонов на границе пузырьковых сред с разными свойствами .....	188

<b>Орлик Е.В., Бочаров О.Б., Игнатенко Я.С., Гаврилов А.А.</b> Влияние расхода несущей фазы на осадочный слой шлама в кольцевом горизонтальном канале в окрестности соединительной муфты .....	189
<b>Осипов А.А., Асхадуллин Р.Ш.</b> К вопросу о свойствах пульсаций температуры в расплавах тяжелых металлов .....	190
<b>Остапчук М.А., Шишов Д.М., Занегин С.Ю.</b> Изменение свойств полупроводниковых диодов при охлаждении жидким азотом .....	191
<b>Павленко А.Н., Жуков В.Е., Мезенцева Н.Н.</b> Теплоотдача и критический тепловой поток на модифицированной поверхности при кипении в жидком азоте .....	192
<b>Пахомов М.А., Терехов В.И.</b> Численное моделирование теплопереноса в газокапельном отрывном потоке за двумерным препятствием .....	193
<b>Перепелица Б.В.</b> Течение жидкости по гофрированным листам упаковки .....	194
<b>Петрова А.В., Сафонов А.И.</b> Создание структурированных поверхностей на металлах путем обработки плазмой тлеющего разряда .....	195
<b>Печенегов Ю.Я., Косов В.А.</b> Теплогидравлическая эффективность теплообмена газов при их нагреве и охлаждении .....	196
<b>Пещенюк Ю.А., Семенов А.А., Айбазян Г.Е., Гатапова Е.Я.</b> Исследование испарения плоской капли жидкости шлирен-методом .....	197
<b>Платонов Д.В., Сентябов А.В., Минаков А.В., Шторк С.И.</b> Численное исследование вихревой структуры в цилиндрической тангенциальной камере .....	198
<b>Плотников Л.В., Осипов Л.Е., Следнев В.А., Шурупов В.А.</b> Газодинамика и локальная теплоотдача пульсирующих потоков воздуха в длинной трубе при разной интенсивности турбулентности .....	199
<b>Поволоцкий И.И., Волосников Д.В., Игольников А.А., Скрипов П.В.</b> Теплоотдача к импульсно нагреваемому водному раствору 2,6-лутидина и условия её интенсификации .....	200
<b>Попов И.А., Константинов Д.Ю., Амирова Л.М., Жукова Ю.В., Чорный А.Д.</b> Теплофизические свойства углепластиковых полимерных композитных материалов .....	201
<b>Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Светонос А.И., Курдюмов А.С., Чинак А.В.</b> Особенности движения газовых пузырей в расплаве жидкометаллического теплоносителя .....	202
<b>Прохоров Е.С.</b> Моделирование распространения детонационной волны в газовой смеси на основе углеводородного топлива при недостатке окислителя .....	203
<b>Пухначев В.В., Фроловская О.А.</b> Задача Рэлея – Бенара в моделях релаксирующих жидкостей .....	204
<b>Равикович Ю.А., Холобцев Д.П., Ермилов Ю.И., Федоров А.А., Иванов И.Г.</b> Усовершенствование математических моделей систем криообеспечения ВТСП-устройств .....	205
<b>Расчектаева Е.П., Станкус С.В.</b> Теплопроводность NOVEC 7000 в паровой фазе .....	206
<b>Родионов А.А., Шухов Ю.Г., Мельник А.В., Васильев М.М., Старинский С.В.</b> Синтез супергидрофильных пленок $Al_2O_3$ методом наносекундной лазерной абляции алюминия в химически активном фоновом газе .....	207
<b>Розанов Е.О., Проценко С.П., Байдаков В.Г.</b> Активационный барьер кристаллизации переохлажденной жидкости: метадинамическое моделирование .....	208
<b>Роньшин Ф.В., Tadrist L., Кабов О.А.</b> Исследование динамики роста одиночного парового пузыря в условиях микрогравитации .....	209
<b>Роньшин Ф.В., Дементьев Ю.А., Чиннов Е.А.</b> Экспериментальное исследование кипения в плоском микроканале .....	210
<b>Рудяк В.Я.</b> Реология флюидов. причины ее изменения и следствия .....	211
<b>Рябов М.Н., Гобызов О.А., Бильский А.В.</b> Исследование реологических характеристик неньютоновских жидкостей по динамике растяжения жидкого мостика .....	212
<b>Садовский И.А., Катасонов М.М., Козлов В.В.</b> Управление развитием собственных возмущений пограничного слоя скользящего крыла с помощью распределенного отсоса через мелкоперфорированную поверхность .....	213
<b>Сайкина Т.А., Чухно В.И., Усов Э.В., Прибатурин Н.А.</b> Результаты расчетов с использованием кода ЕВКЛИД/v2 отдельных экспериментов по термическому разрушению твэлов и твс .....	214
<b>Сальников М.В., Сухинин Г.И.</b> Использование технологии графических ядер для расчёта пространственных распределений объёмного заряда вблизи цепочек пылевых частиц .....	215
<b>Сапожников С.З., Митяков А.В., Андреев Ю.В., Проскурин В.М., Павлов А.В., Бобылев П.Г.</b> Экспериментальное изучение тепловыделения от газового факела методом градиентной теплотметрии .....	216
<b>Сапожников С.З., Павлов А.В., Бобылев П.Г.</b> Исследование кипения в большом объеме воды методом градиентной теплотметрии .....	217
<b>Самошкин Д.А., Абдуллаев Р.Н., Агажанов А.Ш., Станкус С.В.</b> Экспериментальное исследование удельной теплоемкости сплавов магния с кальцием в широком интервале температур .....	218
<b>Сахапов С.З., Пинаев В.А.</b> Определение температуры дугового разряда методом оптической эмиссионной спектроскопии .....	219
<b>Сахнов А.Ю.</b> Локальная ламинаризация в ускоренном течении с существенно пониженной плотностью газа вблизи стенки .....	220
<b>Северин А.С., Илюшин Б.Б., Первунин К.С.</b> Распределение старших моментов скорости и ее производной в круглой затопленной струе .....	221

<b>Семенов А.А., Зайцев Д.В., Кабов О.А.</b> Испарение капель воды на нагреваемых подложках, покрытых одностенными и многостенными карбоновыми нанотрубками .....	222
<b>Семенов А.Н., Косинов А.Д.</b> Численное моделирование взаимодействия стационарной ударной волны и сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине .....	223
<b>Семенов Д.С., Ненарокомов А.В.</b> Расчетно-экспериментальный метод идентификации моделей теплопереноса без использования контактных средств измерения температуры .....	224
<b>Сердюков В.С., Миськив Н.Б., Владыко И.В., Суртаев А.С.</b> Исследование теплообмена и гидродинамических параметров спрейного орошения прозрачной импактной поверхности .....	225
<b>Сероштанов В.В., Маслов В.А., Митяков А.В.</b> Исследование конвективного теплообмена в ряде цилиндров .....	226
<b>Серяков А.В., Алексеев Анд.П.</b> Численные исследования тепловых характеристик тепловых труб .....	227
<b>Ситников В.О., Гатапова Е.Я.</b> Исследование режимов кипения и динамики падающей капли жидкости при высоких температурах.....	228
<b>Скибина Н.П., Фарапонов В.В.</b> Исследование аэродинамического нагрева твердого углеводородного горючего материала при тангенциальном обтекании сверхзвуковым потоком в модельной АДТ .....	229
<b>Скрипкин С.Г., Цой М.А., Кашкарова М.В., Кравцова А.Ю.</b> Нестационарные и квазистационарные каверны в узких щелевых каналах .....	230
<b>Сластная Д.А., Хребтов М.Ю., Мулладжанов Р.И.</b> Моделирование пламени метановоздушной смеси с использованием детальных кинетических механизмов .....	231
<b>Слепцов С.Д., Саввинова Н.А.</b> Моделирование сложного теплообмена системы «подложка-лед» .....	232
<b>Сомванши П.М., Чеверда В.В., Кабов О.А.</b> Взаимодействие изотермической капли жидкости с супергидрофобной поверхностью .....	233
<b>Старинская Е.М., Миськив Н.Б., Старинский С.В., Терехов В.В.</b> Изучение процессов тепломассопереноса при испарении капель различных наножидкостей.....	234
<b>Старинский С.В., Шухов Ю.Г., Сафонов А.И., Старинская Е.М., Миськив Н.Б., Ли Ю.П., Терехов В.В.</b> Растекание капель воды на перегретых супергидрофобных и супергидрофильных поверхностях с идентичной морфологией .....	235
<b>Степанов К.И., Мухин Д.Г.</b> Перспективы применения абсорбционных бромистолитиевых термотрансформаторов в централизованных системах отопления России .....	236
<b>Степашева Е.Д., Засимова М.А., Иванов Н.Г., Подмаркова А.Д.</b> Вихреразрешающее моделирование турбулентного течения и теплообмена при распространении плоской воздушной струи в ограниченном пространстве .....	237
<b>Стрелова С.В., Гордеева Л.Г., Аристов Ю.И.</b> Динамика сорбции паров воды в системе «хлорид лития/силикагель»: интенсификация теплопередачи в компактных слоях сорбента.....	238
<b>Стрижак П.А., Ткаченко П.П., Шлегель Н.Е., Кропотова С.С.</b> Взаимодействие капель жидкостей и твердых частиц в спреях .....	239
<b>Суслов Д.А., Скрипкин С.Г., Литвинов И.В., Гореликов Е.Ю., Цой М.А.</b> Экспериментальное параметрическое исследование нестационарных вихревых структур в конусе модельного закручивающего устройства.....	240
<b>Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Саломатов В.В., Карелин В.А.</b> Повышение эффективности сжигания древесной биомассы в топках паровых и водогрейных котлов.....	241
<b>Терехов В.И.</b> Проблемы тепло- и массообмена человека с окружающей средой. Последние достижения и новые задачи.....	242
<b>Терехов В.И., Экаид А.Л., Яссин Х.Ф.</b> Ламинарная свободная конвекция в вертикальном конвергентном канале .....	243
<b>Тесленко В.С., Дрожжин А.П.</b> Торможение и ускорение встречных фронтов горения в пропан-кислородной смеси .....	244
<b>Тетерюков А.В., Пастухов С.М., Чорный А.Д.</b> Моделирование пожара при горении кровли .....	245
<b>Тимкин Л.С., Горелик Р.С., Курдюмов А.С.</b> Экспериментальное исследование развития газожидкостного течения в модели биореактора.....	246
<b>Толстогузов Р.В.</b> Измерение поля температуры в ламинарном пламени на основе ЛИФ гидроксильного радикала.....	247
<b>Томилов С.Н., Козлов С.А., Поддубный И.И., Свириденко М.Н., Лешуков А.Ю., Путрик А.Б.</b> Оценка влияния теплового контакта в системе крепления панели первой стенки на распределение температуры в модуле blankets ИТЭР .....	248
<b>Тупикин А.В., Лукашов В.В.</b> Восстановление распределения температуры и состава в диффузионном факеле по показателю преломления .....	249
<b>Ушаков К.Ю., Богомоллов А.Р., Азиханов С.С., Петров И.Я.</b> Продукты двухстадийной термообработки резинотехнических отходов .....	250
<b>Федоренко Р.М., Антонов Д.В., Стрижак П.А.</b> Коллективные эффекты при формировании вторичных фрагментов в результате микровзрывной фрагментации двухжидкостных капель .....	251
<b>Федяева О.Н., Востриков А.А., Артамонов Д.О., Шишкин А.В.</b> Особенности слоевого горения биотоплив в потоке водокислородного флюида .....	252

<b>Хабриев И.Ш., Хайрутдинов В.Ф., Яруллин Л.Ю., Ахметзянов Т.Р., Салихов И.З., Сабирова С.В.</b> Фазовые равновесие бифенила в сверхкритической бинарной смеси пропан/бутан .....	253
<b>Хайруллин А.Р.</b> Калорические свойства жидкого сплава $\text{Na}_{15}\text{Pb}_4$ .....	254
<b>Хисматуллин Р.М., Ермаков А.М., Салахов Р.Р.</b> Сравнительный анализ эффективности циклов климатических установок электробусов на различных фреонах .....	255
<b>Хорева В.А., Елистратов С.Л.</b> Экологическая эффективность солнечной энергетики на юге Сибири .....	256
<b>Хоронжевский Д.А., Басов Д.К., Цветков К.В., Щеколдин В.В., Пантюшин С.И., Литышев А.В.</b> Анализ возможных условий и режимов истечения во вставке ограничительной, применительно к реакторной установке ВВЭР-1000 .....	257
<b>Хуссейн Музамиль, Шеремет М.А.</b> Естественная конвекция и тепловое излучение в наножидкости вдоль вертикальной растягивающейся пластины, расположенной внутри пористой среды, при наличии однородного магнитного поля .....	258
<b>Цвелодуб О.Ю.</b> Противоточное течение пленки жидкости и турбулентного потока газа – универсальный источник эволюционных моделей .....	259
<b>Циммерман А.И., Шаненков И.И.</b> Влияние газовой атмосферы в камере-реакторе на продукт плазмодинамического синтеза в системе Fe-O.....	260
<b>Чеведа В.В., Кабов О.А.</b> Стабильное течение пленки жидкости при изменяющемся уровне силы тяжести .....	261
<b>Шадрин Е.Ю., Садкин И.С., Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Копьев Е.П.</b> Исследование процесса совместного сжигания жидкого и пылеугольного топлива в горелочном устройстве малой мощности .....	262
<b>Шаклеин А.А., Коробейничев О.П., Карпов А.И., Трубачев С.А., Шмаков А.Г., Палецкий А.А.</b> Численное исследование распространения пламени по поверхности полимерных материалов .....	263
<b>Шамирзаев А.С.</b> Перепад давления при течении двухфазных зетропных смесей .....	264
<b>Шамирзаев А.С., Кузнецов В.В.</b> Экспериментальное исследование теплообмена при кипении изобутана в микроканалах.....	265
<b>Шамирзаев А.С., Мордовской А.С., Кузнецов В.В.</b> Экспериментальное исследование охлаждения системой затопленных микроструй .....	266
<b>Шараборин Д.К.</b> Измерение распределения температуры в ламинарном бедном пламени этилена методом ПЛИФ .....	267
<b>Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В., Штерн В.Н.</b> Экспериментальное исследование закономерностей распада вихря для системы двух несмешиваемых жидкостей .....	268
<b>Шатекова А.И., Зайцев Д.В.</b> Зависимость конденсационного роста левитирующих микрокапель от параметров эксперимента.....	269
<b>Шевырёв С.А., Беседин Д.С., Сезонов П.А.</b> Паровая и пароуглекислотная газификация биомассы в кипящем слое .....	270
<b>Шестаков М.В., Токарев М.П.</b> Исследование гидродинамической структуры течения в упрощенной модели периферийной ячейки ТВС .....	271
<b>Шишкин Н.Е.</b> Нуклеация вблизи поверхности капель разных жидкостей .....	272
<b>Штелинг В.С., Комов А.Т., Вершинина Ю.В., Дедов А.В., Захаренков А.В., Щербаков П.П.</b> Теплообмен высокотемпературной поверхности с диспергированным потоком теплоносителя.....	273
<b>Шулепова Е.В., Шеремет М.А.</b> Влияние угла наклона полости и внутреннего теплопроводного блока на интенсивность естественной конвекции в дифференциально-обогреваемой области .....	274
<b>Щеклеин С.Е.</b> О возможности повышения экологической толерантности тепловой энергетики с использованием дополнительных ядерных энергоисточников .....	275
<b>Щербаков Г.Е., Герасимов А.С., Чохар И.А., Терехов В.И.</b> Экспериментальное исследование компонентов теплового потока на поверхности тела человека при вариации температуры окружающей среды .....	276
<b>Ягодницына А.А., Плохих И.А., Ковалев А.В., Бильский А.В.</b> Предсказание режимов течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах на основе методов машинного обучения .....	277
<b>Яковенко С.Н.</b> Вибрационное возбуждение для управления струйными течениями .....	278
<b>Якуш С.Е., Сиваков Н.С., Мелихов В.И., Мелихов О.И.</b> Численное исследование механизмов взаимодействия капли расплава с водой .....	279
<b>Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В.</b> Интегральные характеристики недорасширенных струй малой плотности и вопросы моделирования.....	280
<b>Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В.</b> Визуализация газовых и газокпельных струй при истечении в вакуум .....	281
<b>Sergei S. Sazhin</b> Puffing and Micro-explosions in Composite Droplets: Simple Models of Complex Processes.....	282

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Castanet G. 7  
 Sergei S. Sazhin. 281  
 Tadrict L. 209  
 Абдуллаев Р.Н. 1, 218  
 Агажанов А.Ш. 218  
 Агафонцев М.В. 2, 145, 151  
 Азиханов С.С. 249  
 Айвазян Г.Е. 197  
 Алексеев Анд.П. 226  
 Алексеев М.В. 150  
 Алексеенко С.В. 3, 261  
 Алифанов О.М. 4  
 Алиферов А.И. 8  
 Алпацкий Н.С. 5, 161  
 Амирова Л.М. 201  
 Андреев Ю.В. 216  
 Андрущенко В.А. 6  
 Анисимова М.А. 110  
 Антонов Д.В. 7, 77, 250  
 Ануфриев И.С. 261  
 Ануфриева О.И. 158  
 Аньшаков А.С. 8  
 Аристов Ю.И. 237  
 Аронсон К.Э. 15  
 Артамонов Д.О. 251  
 Арушанян Р.Р. 120  
 Архипов В.А. 9, 10, 11  
 Архипов Д.Г. 12  
 Астанина М.С. 13  
 Астахов В.В. 182  
 Асхадуллин Р.Ш. 190  
 Афанасьев А.А. У 14  
 Ахметзянов Т.Р. 252  
 Байдаков В.Г. 208  
 Балакин Д.Ю. 15  
 Балобанов Н.А. 16  
 Баранов Е.А. 162  
 Баранова Т.А. 17  
 Барановский Н.В. 18  
 Бараховская Э.В. 155  
 Барсуков А.В. 19  
 Барсуков А.Р. 54  
 Барткус Г.В. 20, 21  
 Басалаев С.А. 9, 10  
 Басов Д.К. 256  
 Батрак Н.В. 22  
 Батуева М.А. 51  
 Бахтизин Р.З. 91  
 Беденко Д.В. 23  
 Белавина Е.А. 24  
 Белослудцев В.В. 25  
 Беляев А.В. 26  
 Бердников В.С. 27, 107, 165, 166  
 Бернар А. 50  
 Беседин Д.С. 269  
 Бильский А.В. 47, 112, 212, 276  
 Бобров М.С. 28  
 Бобылев А.В. 62  
 Бобылев П.Г. 216, 217  
 Богомолов А.Р. 249  
 Богословцева А.А. 160  
 Божеева Д.М. 29, 129  
 Бойко А.В. 30  
 Бойко Е.В. 31  
 Болатова Ж. 60  
 Бондарева Н.С. 32  
 Борзенко Е.И. 33  
 Борискин А.А. 34  
 Борисов Б.В. 35  
 Бородин А.В. 104  
 Бородулин В.И. 30, 36, 37  
 Бочаров О.Б. 189  
 Будник С.А. 4  
 Букрина Н.В. 111  
 Бусов К.А. 38  
 Бусыгин С.В. 113  
 Быковская Е.Ф. 97  
 Быковский Ф.А. 39, 40  
 Вавилов Д.В. 67  
 Варава А.Н. 70  
 Васильев А.А. 34  
 Васильев М.М. 41, 207  
 Васнев И.Р. 42  
 Ведерников Е.Ф. 39, 40  
 Вершинина Ю.В. 43, 272  
 Викулов А.Г. 4  
 Винокуров В.А. 27, 97  
 Винокуров В.В. 27, 97  
 Владимиров В. Ю. 44  
 Вожаков И.С. 45, 140  
 Волков С.А. 11  
 Володин О.А. 46  
 Волосников Д.В. 200  
 Вольф М. 51  
 Воробьев М.А. 101  
 Вострецов С.О. 47  
 Востриков А.А. 251  
 Вяткина В.А. 18  
 Гаврилов А.А. 48, 49, 139, 189  
 Гармаев С.С. 50  
 Гасенко О.А. 75, 131  
 Гатапова Е.Я. 51, 197, 227  
 Гвоздяков Д.В. 154  
 Гелаш А.А. 61  
 Генералов Д.А. 113  
 Герасимов А.С. 275  
 Гешев П.И. 52  
 Гибанов Н.С. 53  
 Гныря А.И. 123  
 Гобызов О.А. 212  
 Голых Р.Н. 54  
 Гольдфельд М.А. 42  
 Горбачев М.В. 55  
 Гордеева Л.Г. 237  
 Гордиенко М.Р. 56, 98  
 Гордин С.А. 57  
 Горелик Р.С. 245  
 Гореликов Е.Ю. 239  
 Гореликова А.Е. 58  
 Гоц С.С. 91  
 Граур И.А. 51  
 Грекова А.Д. 59  
 Гришков В.А. 168  
 Громов К.О. 78  
 Губин В.Е. 60  
 Гудько А.С. 61  
 Гузанов В.В. 62  
 Гурьянов А.И. 109, 187  
 Гурьянова М.М. 187  
 Давыдов М.Н. 63  
 Данилов И.В. 116, 185  
 Дедев А.В. 26, 64, 70, 272  
 Дектерев А.А. 29, 49, 65, 66, 67, 129, 139, 163  
 Дектерев Ар.А. 66, 67  
 Дектерев Д.А. 66, 67, 139  
 Дементьев Ю.А. 68, 210  
 Демидов А.Л. 15, 69  
 Демидов А.С. 70  
 Деревич И.В. 71  
 Деревянников И.А. 124  
 Держо О.Г. 72  
 Деринг Е.Д. 73  
 Димов С.В. 74, 75  
 Добросельский К.Г. 76  
 Домаров П.В. 8  
 Дорохов В.В. 77  
 Дрожжин А.П. 78, 243  
 Дубровин К.А. 73  
 Дулин М.Н. 79  
 Дутова О.С. 80  
 Евдокименко И.А. 81  
 Егошина О.В. 82  
 Елистратов С.Л. 83, 255  
 Ермаков А.М. 254  
 Ермилов Ю.И. 205  
 Ждан С.А. 39, 40  
 Жданова А.О. 132  
 Жеребятьев В.И. 84  
 Жерибор М.О. 85  
 Жуков В.Е. 86, 192  
 Жукова Ю.В. 17, 201  
 Журавлев Д.О. 57  
 Зайнуллина Э.Р. 87  
 Зайцев В.П. 158  
 Зайцев Д.В. 25, 105, 168, 222, 268  
 Замураев В.П. 88  
 Замчий А.О. 162  
 Занегин С.Ю. 89, 191  
 Занин Б.Ю. 5, 161  
 Зарвин А.Е. 73  
 Зарипов Д.И. 149  
 Зарипов Ф.А. 90  
 Засимова М.А. 236  
 Захаренков А.В. 70, 272  
 Захаринский Ю.Н. 139  
 Захаров Ю.А. 91  
 Звонарева С.К. 82  
 Зезюлин И.В. 56  
 Зенков А.В. 154  
 Золотарев К.В. 97  
 Золоторев Н.Н. 9, 10, 11  
 Золотухина О.С. 108  
 Зонов А.С. 92  
 Зубавичус Я.В. 97  
 Зубко В.В. 89



- Иванов А.В. 30, 36, 37  
Иванов И.Г. 205  
Иванов Н.Г. 236  
Иванов Н.С. 89  
Иващенко В.А. 93  
Иващенко Е.И. 94  
Игнатенко Я.С. 189  
Игольников А.А. 200  
Ильченко Д.А. 54  
Илюшин Б.Б. 221  
Исаев С.А. 95  
Исупов М.В. 96  
Кабардин И.К. 56, 98  
Кабов О.А. 74, 97, 105, 168, 209, 222, 232, 260  
Какаулин С.В. 56, 98  
Калинина А.П. 88  
Калтаев А.Ж. 154  
Каляда В.В. 73  
Каприлевская В.С. 5, 99, 161  
Карелин В.А. 100, 240  
Карпов А.И. 262  
Карпов Д.А. 113  
Касымов Д.П. 145  
Катасонов М.М. 99, 213  
Качанов Ю.С. 36, 37  
Кашинский О.Н. 58, 101  
Кашкарова М.В. 102, 229  
Кашковский А.В. 103  
Квон А.З. 62  
Киндра В.О. 92  
Кирдяшкин А.А. 104  
Кирдяшкин А.Г. 104  
Кириченко Д.П. 105  
Кириченко Е.О. 105  
Киселев В.П. 106  
Киселев С.П. 106  
Кислицын С.А. 107, 108  
Клочков А.К. 71  
Клюев А.Ю. 109  
Князева А.Г. 110, 111  
Ковалев А.В. 20, 47, 112, 276  
Ковалев К.Л. 89  
Ковалев О.Б. 23  
Ковальногов В.Н. 113, 114  
Кожухов Н.Н. 121  
Козлов В.В. 99, 115, 213  
Козлов С.А. 116, 247  
Козловский Ю.М. 1, 117  
Козюлин Н.Н. 94, 118  
Кокорин А.В. 119  
Колесников Б.П. 120  
Комов А.Т. 70, 272  
Коновалов Д.А. 121  
Константинов В.О. 162  
Константинов Д.Ю. 201  
Копалейшвили Н.Г. 22  
Копылов Н.П. 132  
Копьев Е.П. 122, 261  
Коробейничев О.П. 262  
Коробков С.В. 123  
Косинов А.Д. 223  
Косов В.А. 196  
Кочергин А.В. 90  
Кочкин Д.Ю. 97, 124, 172  
Кравцова А.Ю. 102, 143, 229  
Крайнов А.Ю. 169, 170  
Кривошеева И.О. 59  
Кропотова С.С. 132, 238  
Кудров А.И. 125  
Кудрявцев А.Н. 103  
Кузенов В.В. 22  
Кузнецов А.В. 126  
Кузнецов В.А. 29, 65, 129, 157  
Кузнецов В.В. 21, 127, 130, 131, 264, 265  
Кузнецов Г.В. 35, 132, 240  
Кузнецов Д.В. 128  
Кундашкин А.Д. 133  
Курдюмов А.С. 101, 202, 245  
Кухарчук И.Г. 17  
Лабусов С.В. 134  
Ласковец Е.В. 135  
Лебедев А.А. 3  
Лебедев А.С. 136  
Левашов В.Ю. 153  
Левин А.А. 137  
Лежнин С.И. 63  
Леманов В.В. 138  
Лешуков А.Ю. 116, 247  
Ли Ю.П. 234  
Литвиненко М.В. 115  
Литвиненко Ю.А. 115  
Литвинов И.В. 239  
Литвинцев К.Ю. 139, 163  
Литвинцева А.А. 140  
Литышев А.В. 182, 183, 256  
Лобанов П.Д. 81, 202  
Лобасов А.С. 67, 138, 141, 142, 143  
Лобода Е.Л. 2, 144, 145, 151  
Лобода Ю.А. 145  
Лоенко Д.С. 146  
Локотко А.В. 147  
Лопато А.И. 148  
Лукашов В.В. 134, 138, 248  
Лукьянов А.А. 149  
Лукьянов Ан.А. 150  
Лукьянов В.Е. 186  
Лукьянова С.А. 157  
Лунев Н.А. 162  
Луценко А.В. 2, 151  
Лысыков А.И. 59  
Лэ С.Х.К. 152  
Мажейко Н.А. 38  
Майоров А.О. 3  
Майоров В.О. 153  
Макаров М.С. 55  
Максимов В.И. 35  
Мальцев Л.И. 154  
Мамонов В.Н. 164, 173  
Мамонтов Г.Я. 60  
Маняхин И.А. 54  
Марчук И.В. 124, 155  
Масленников Г.Е. 156  
Маслов В.А. 225  
Мацкевич М.Ю. 158  
Мацкевич Н.И. 157, 158  
Мезенцева Н.Н. 86, 192  
Мелихов В.И. 278  
Мелихов О.И. 278  
Мелких А.В. 159  
Мельник А.В. 160, 207  
Мельник Е.А. 5, 161  
Меркулова И.Е. 162  
Мешалкин А.Б. 80  
Мешкова В.Д. 139, 163  
Минаков А.В. 139, 141, 142, 198  
Минаков В.Д. 54  
Миронова Н.В. 83  
Миськив Н.Б. 164, 173, 233, 234  
Митин К.А. 165, 166  
Митина А.В. 165, 166  
Митяков А.В. 216, 225  
Митяков В.Ю. 87  
Михайленко С.А. 167  
Михайлов А.В. 108, 168  
Мищенко Д.А. 30, 36, 37  
Моисеева К.М. 169, 170  
Мордовской А.С. 265  
Моржухина А.В. 4  
Морозов А.А. 171  
Мулладжанов Р.И. 45, 50, 61, 93, 94, 133, 230  
Мунгалов А.С. 97, 124, 172  
Мухин Д.Г. 235  
Мухина М.А. 122  
Нагорнова Т.А. 35  
Назаров А.Д. 119, 164, 173  
Назаров Н.А. 174  
Насырбаев А. 175, 176  
Наумов И.В. 177, 267  
Ненарокомов А.В. 4, 224  
Необъявляющий П.А. 67  
Непогодина Ю.М. 104  
Нигматулин Б.И. 178  
Низовцев М.И. 180, 181  
Никитин А.А. 168  
Никитин А.Д. 156  
Никитин Д.С. 176  
Николаева А.В. 182, 183, 184  
Никулин Б.И. 185  
Никущенко Д.А. 95  
Носков А.С. 186  
Носкова К.Р. 187  
Няшина Г.С. 77  
Огородников И.А. 188  
Орлик Е.В. 189  
Осипов А.А. 190  
Осипов Л.Е. 199  
Осипов П.В. 156  
Остапчук М.А. 191  
Павленко А.М. 5, 99, 161  
Павленко А.Н. 46, 86, 128, 192  
Павлов А.В. 216, 217  
Павлов Г.И. 90  
Пак А.Я. 60  
Палецкий А.А. 262  
Палкин Е.В. 133  
Пантюшин С.И. 182, 183, 184, 256  
Пастухов С.М. 244  
Пахомов М.А. 174, 193  
Первунин К.С. 221

- Перепелица Б.В. 194  
 Перфильева К.Г. 9, 10  
 Петров А.В. 114  
 Петров И.Я. 249  
 Петрова А.В. 195  
 Печенегов Ю.Я. 196  
 Печеркин Н.И. 46  
 Пещенюк Ю.А. 197  
 Пивоваров В.А. 178  
 Пильник А.А. 31, 63  
 Пинаев В.А. 219  
 Платонов Д.В. 67, 198  
 Плотников Л.В. 199  
 Плохих И.А. 276  
 Поволоцкий И.И. 200  
 Поддубный И.И. 116, 185, 247  
 Подмаркова А.Д. 236  
 Полякова В.И. 56  
 Попов И.А. 201  
 Порязов В.А. 170  
 Правдина М.Х. 56  
 Прибатурин Н.А. 202, 214  
 Приходько В.Г. 279, 280  
 Проскурин В.М. 216  
 Прохоров Е.С. 203  
 Прохоров С.В. 43  
 Проценко С.П. 208  
 Пряжников М.И. 142  
 Пуত্রик А.Б. 116, 247  
 Пухначев В.В. 204  
 Пуховой М.В. 74, 97  
 Пятницкая Н.Ю. 24  
 Равикович Ю.А. 205  
 Расчектаева Е.П. 206  
 Рейно В.В. 2, 145  
 Родионов А.А. 207  
 Розанов Е.О. 208  
 Романов В.А. 3  
 Романов Д.В. 3  
 Романов К.В. 3  
 Роньшин Ф.В. 68, 97, 209, 210  
 Рудяк В.Я. 211  
 Рыжков А.Ф. 156  
 Рыжков С.В. 22  
 Рябов М.Н. 212  
 Рябчиков А.Ю. 69  
 Ряжских В.И. 121  
 Сабирова С.В. 252  
 Саввинова Н.А. 231  
 Садкин И.С. 122, 261  
 Садовский И.А. 213  
 Сажин С.С. 7  
 Сайкина Т.А. 214  
 Салахов Р.Р. 254  
 Салихов И.З. 252  
 Саломатов В.В. 240  
 Саломатов Вл.В. 100  
 Сальников М.В. 215  
 Самошкин Д.А. 157, 218  
 Сапожников С.З. 216, 217  
 Сафаров А.С. 137  
 Сафонов А.И. 160, 195, 234  
 Сахапов С.З. 219  
 Сахнов А.Ю. 220  
 Светоносков А.И. 202  
 Свириденко М.Н. 116, 185, 247  
 Северин А.С. 221  
 Сезонов П.А. 269  
 Семенов А.А. 197, 222  
 Семенов А.Н. 223  
 Семенов Д.С. 224  
 Семерикова А.Н. 157, 158  
 Сентябов А.В. 49, 67, 198  
 Сергачев Д.В. 23  
 Серов А.Ф. 119, 164, 173  
 Сероштанов В.В. 225  
 Серяков А.В. 226  
 Сибиряков Н.Е. 74  
 Сиваков Н.С. 278  
 Сидельников Н.Е. 26  
 Симанов Н.А. 156  
 Ситников В.О. 227  
 Скибина Н.П. 228  
 Скрипкин С.Г. 143, 229, 239  
 Скрипов П.В. 159, 200  
 Сладкая Д.А. 230  
 Следнев В.А. 199  
 Слепцов С.Д. 231  
 Смовж Д.В. 31  
 Сомванши П.М. 232  
 Сорокин М.И. 136  
 Соснин А.А. 57  
 Станкус С.В. 117, 157, 206, 218  
 Старинская Е.М. 233, 234  
 Старинский С.В. 41, 207, 233, 234  
 Степанов Е.А. 3  
 Степанов К.И. 235  
 Степашева Е.Д. 236  
 Стерлягов А.Н. 180, 181  
 Стрелова С.В. 237  
 Стрижак П.А. 7, 77, 132, 238, 250  
 Суслов Д.А. 239  
 Сухинин Г.И. 215  
 Сыродой С.В. 240  
 Сюзаяв А.И. 55  
 Тамбовцев А.С. 115  
 Терехов В.В. 19, 41, 233, 234  
 Терехов В.И. 19, 55, 123, 174, 193, 241, 242, 275  
 Тесленко В.С. 243  
 Тетерюков А.В. 244  
 Тимкин Л.С. 245  
 Титарев В.А. 171  
 Титов Д.М. 4  
 Ткачев Е.Н. 158  
 Ткаченко П.П. 238  
 Токарев М.М. 59  
 Токарев М.П. 93, 270  
 Толстогузов Р.В. 246  
 Томилов С.Н. 116, 247  
 Трифионов В.А. 157  
 Трубачев С.А. 262  
 Тупикин А.В. 134, 248  
 Тэпфер Е.С. 65  
 Урбах А.Э. 8  
 Усанина А.С. 9, 10  
 Усов Э.В. 214  
 Ушаков К.Ю. 249  
 Фальков А.А. 186  
 Фандеев А.С. 92  
 Фарапонов В.В. 228  
 Федоренко Р.М. 250  
 Федоров А.А. 205  
 Федоров Р.В. 113, 114  
 Федорова Н.Н. 42  
 Федяева О.Н. 251  
 Филимонов С.А. 139, 163  
 Филиппов М.В. 174  
 Фиников К.А. 97  
 Финников К.А. 139  
 Фроловская О.А. 204  
 Хабахпашев Г.А. 12  
 Хабриев И.Ш. 252  
 Хайрулин А.Р. 253  
 Хайрулин Р.А. 1  
 Хайрутдинов В.Ф. 252  
 Хан П.В. 137  
 Хисматуллин Р.М. 254  
 Хмельев В.Н. 54  
 Хмель С.Я. 44  
 Холобцев Д.П. 205  
 Хорева В.А. 255  
 Хоронжевский Д.А. 256  
 Хребтов М.Ю. 28, 45, 85, 94, 118, 133, 230  
 Хряпенко К.Д. 57  
 Хуссейн Музамиль 257  
 Цвелодуб О.Ю. 258  
 Цветков К.В. 256  
 Циммерман А.И. 259  
 Цой М.А. 143, 229, 239  
 Чеверда В.В. 140, 232, 260  
 Чернов А.А. 63  
 Чинак А.В. 58, 202  
 Чиннов Е.А. 44, 68, 210  
 Чорный А.Д. 17, 201, 244  
 Чохар И.А. 174, 275  
 Чукалин А.В. 114  
 Чуркин А.Н. 184  
 Чухно В.И. 214  
 Шадрин Е.Ю. 122, 261  
 Шаклеин А.А. 262  
 Шакура В.А. 54  
 Шамирзаев А.С. 263, 264, 265  
 Шаненков И.И. 259  
 Шарaborин Д.К. 266  
 Шарипов Т.И. 91  
 Шарифуллин Б.Р. 177, 267  
 Шаров К.А. 138  
 Шатекова А.И. 268  
 Шебанова О.В. 184  
 Шевырёв С.А. 269  
 Шеремет М.А. 13, 32, 53, 125, 146, 152, 167, 257, 273  
 Шершнева А.А. 103  
 Шестаков М.В. 270  
 Шишкин А.В. 251  
 Шишкин Н.Е. 271  
 Шишов Д.М. 191  
 Шлегель В.Н. 157  
 Шлегель Н.Е. 238  
 Шмаков А.Г. 115, 262

Шрагер Г.Р. 33  
Штелинг В.С. 272  
Штерн В.Н. 177, 267  
Шторк С.И. 198  
Шулепова Е.В. 273  
Шульженко П.Д. 163  
Шурупов В.А. 199  
Шухов Ю.Г. 41, 207, 234

Щеклеин С.Е. 274  
Щеколдин В.В. 256  
Щербаков Г.Е. 275  
Щербаков П.П. 272  
Экаид А.Л. 242  
Яворский Н.И. 56  
Ягодницына А.А. 20, 47, 112, 276  
Яковенко С.Н. 50, 277

Якуш С.Е. 278  
Яруллин Л.Ю. 252  
Ярыгин В.Н. 279, 280  
Ярыгин И.В. 279, 280  
Яскин А.С. 73  
Яссин Х.Ф. 242  
Ястребов А.К. 153

Ответственный за выпуск  
*Скрипкин С.Г. к. ф-м. н*

Вёрстка  
*Мартынец А.В.*

Подписано в печать 01.09.2022. Печать офсетная.  
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 17,21.  
Тираж ??? экз. Заказ № ???.

---

Отпечатано в типографии «АЛЕКСПРЕСС»  
ИП Малыгин Алексей Михайлович  
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6/1, оф. 104.  
Тел.: +7 (383) 217-43-46, +7 (913) 922-19-07



