



**ПРОБЛЕМЫ
МЕХАНИКИ 23**

Теория, эксперимент и новые технологии

XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых

26 февраля - 6 марта 2023 г.
Новосибирск - Шерегеш
Россия

Тезисы докладов

Новосибирск
2023



СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ
ИМ. С. А. ХРИСТИАНОВИЧА СО РАН
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМ. ПРОФ. Н. Е. ЖУКОВСКОГО

ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ:
ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Тезисы докладов
XVII Всероссийской конференции молодых ученых

26 февраля – 6 марта 2023 г.,
Новосибирск – Шерегеш

Новосибирск ♦ 2023

УДК 532.516 + 532.517 + 534.29

ББК 22.253.3 + 22.251

П781

П781 Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии : Тез. докл. XVII Всерос. конф. молодых ученых 26 февраля — 6 марта 2023 г., Новосибирск — Шерегеш / под ред. Е. И. Крауса; Новосиб. гос. ун-т. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2023. — 240 с.

ISBN 978-5-4437-1425-7

Всероссийская школа-конференция для молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» — научное мероприятие, которое проводится на базе Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН совместно с Центральным аэрогидродинамическим институтом им. проф. Н. Е. Жуковского. Конференция 2023 г. посвящена 115-летию со дня рождения академика С. А. Христиановича.

На конференции обсуждаются последние результаты экспериментальных исследований и численного моделирования, полученные в области механики сплошных и гетерогенных сред, гидродинамической неустойчивости, ламинарно-турбулентного перехода, газовой динамики, теории удара и высокоскоростного взаимодействия тел, аэродинамики, водородной энергетики, и возникающие при этом вычислительные проблемы и методы их решения.

С заказными докладами приглашены ведущие специалисты, работающие в различных научных направлениях в институтах РАН и высшей школы, чьи доклады дадут достаточно полную картину исследований по механике жидкости и газа, а также по смежным направлениям.

В настоящем сборнике в основном представлены доклады молодых ученых — участников конференции. Опубликованные здесь последние результаты могут быть интересны ученым, аспирантам и студентам, занятым вопросами механики.

УДК 532.516 + 532.517 + 534.29

ББК 22.253.3 + 22.251

© Институт теоретической
и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 2023
© Новосибирский государственный
университет, 2023

ISBN 978-5-4437-1425-7

СНИЖЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА РЕЛЬЕФНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ПОКРЫТОЙ СЛОЕМ СМАЗКИ*

Ф. А. Абрамов, И. А. Амелюшкин

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)*

Снижение сопротивления трения жидкости о поверхность, а также движущихся тел, разделенных слоем смазки, является одной из актуальных задач аэрогидродинамики и представляет большой практический интерес в широком спектре технических систем, в частности в развитии гидродинамических машин, транспортных систем и при борьбе с обледенением летательных аппаратов. В настоящей работе получены аналитические выражения для коэффициентов трения и отношения расходов жидкости в плоских, цилиндрических каналах, между плоскостями, между соосными цилиндрами, а также для момента сил сопротивления при вращении соосных цилиндров в зависимости от толщины слоя смазки и геометрических параметров рельефа поверхности, которая обеспечивает удержание слоя смазки за счет поверхностных эффектов.

Эффект снижения сопротивления достигается за счет удержания в порах поверхности обтекаемого жидкостью тела слоя воздуха, который выполняет роль смазки (рис. 1, *a*). Толщина слоя смазки h определяется размерами выступов рельефной поверхности L и поверхностными свойствами, которые описываются краевым углом смачивания плоской поверхности жидкостью в воздухе. При этом в результате приравнивания значения касательных напряжений на границе раздела жидкости и смазки выражение для длины скольжения имеет следующий вид: $b \cong h \cdot \mu_{\text{ж}} / \mu_{\text{см}}$, $V(h) = b \partial V(h) / \partial y$. Если роль смазки (индекс см) выполняет воздух, а жидкости (индекс ж) — вода, отношение вязкостей $\mu_{\text{ж}} / \mu_{\text{см}} \cong 50$. При движении жидкости между плоскостями, одна из которых подвижна (см. рис. 1, *a*), а неподвижная покрыта слоем смазки толщиной h , выражение для отношения расходов жидкости (с использованием смазки

* Исследования выполнены при поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-29-13024 и № 19-29-13016, а также в рамках Государственного контракта № 20411.1770290019 18.004 на НИР «Флагман-1».

© Ф. А. Абрамов, И. А. Амелюшкин, 2023

и без нее) имеет следующий вид:
$$\frac{q}{q_0} = \frac{(1 + \xi(2\psi - 1))(1 - \xi)}{(1 + \xi\psi)(1 + \xi)^2}$$
. Здесь $\xi = h/H$ (H — расстояние между плоскостями). При движении жидкости по трубе или в капиллярах выражение для отношения расходов имеет следующий вид:

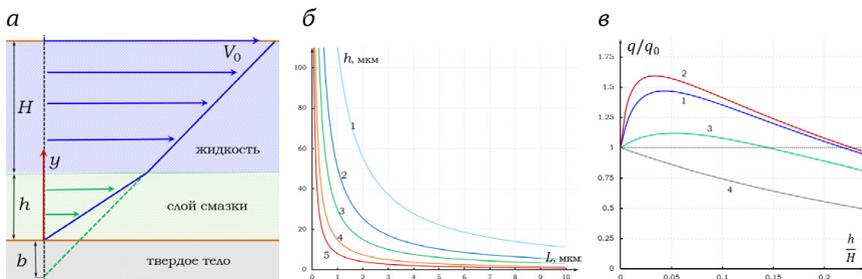


Рис. 1. Особенности скольжения жидкости по рельефному твердому телу, которое покрыто слоем смазки: а — схема течения; б — зависимость толщины слоя воздуха у рельефной поверхности в жидкости от расстояния между выступами рельефа и угла смачивания капли воды на плоской поверхности: 1 — 30°, 2 — 45°, 3 — 60°, 4 — 90°, 5 — 150°; в — эффект изменения расхода жидкости между плоскостями за счет слоя смазки различной вязкости

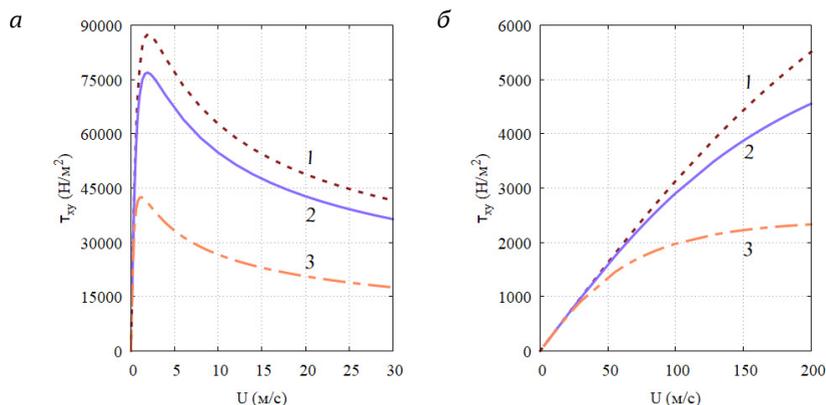


Рис. 2. Зависимость трения от скорости пластины при различных значениях теплопроводности поверхности: а — моторного масла и б — воды при температуре внешних границ $T = 10$ °С: кривые 1-3 соответствуют $\lambda \rightarrow \infty$, $\lambda = 100$ Вт/м·°С, $\lambda = 10$ Вт/м·°С

$$\frac{q}{q_0} = -(1-\xi)^4 \left[\xi \frac{\xi-2}{(1-\xi)^2} \left(3 + 2 \frac{\psi}{\zeta} \right) + 4 \left(1 - \frac{1}{\zeta} \right) \psi \ln(1-\xi) - 1 \right]. \text{ Здесь } \xi = h/R, \text{ где } R -$$

радиус трубы, ζ — отношение плотности жидкости к плотности смазки, ψ — отношение вязкости жидкости к вязкости смазки. На рис. 2 показана возможность снижения сопротивления трения за счет уменьшения вязкости при повышении в результате трения температуры.

Список литературы

1. Абрамов А. А., Абрамов Ф. А., Бутковский А. В., Чернышёв С. Л. Эффект снижения вязкого трения путем блокирования диссипации // Изв. РАН, МЖГ. 2020. № 6. С. 25–32.
2. Амелюшкин И. А., Кудров М. А., Морозов А. О., Щеглов А. С. Математические модели и методы расчета процессов, сопровождающих обледенение летательного аппарата // Тр. Ин-та систем. программирования РАН, 2021. Т. 33, № 5. С. 237–248.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СРЫВА ПОТОКА ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

М. А. Акимов, П. А. Поливанов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск
Новосибирский государственный технический университет,
630073, Новосибирск*

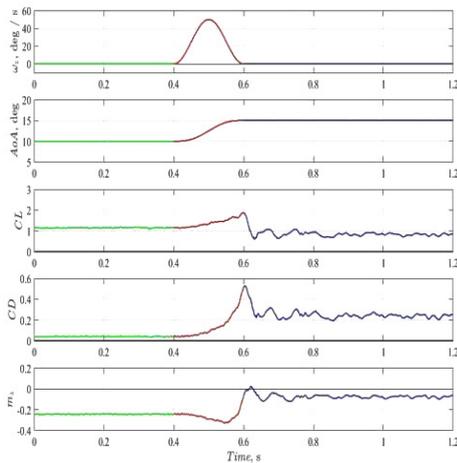
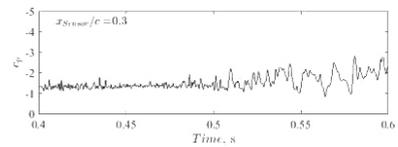
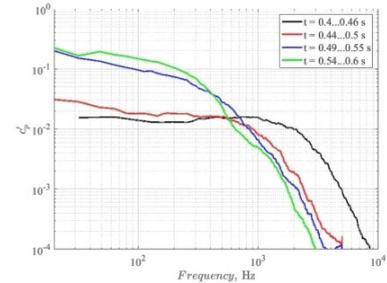
Для исследования динамики полета малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), улучшения устойчивости, управляемости и оптимизации их программ управления [1] на околокритических углах атаки необходимо наличие точных данных о нестационарных аэродинамических характеристиках [2]. Числа Рейнольдса на несущих поверхностях малых БПЛА в основном не превышают $Re \approx 10^5$. При этих числах Рейнольдса на крыле может формироваться ламинарный отрывной пузырь, который оказывает существенное влияние на развитие отрывного течения [3]. Целью работы является исследование влияния ламинарного отрывного пузыря на динамический срыв потока на прямом крыле с профилем NASA 3513.

Рассмотрена численная задача обтекания секции крыла при его вращении по тангажу на околокритических углах атаки при числе Рейнольдса $Re = 1,16 \cdot 10^5$. Расчетная область представляла собой цилиндр с радиусом основания в 4,5 хорды и толщиной 35 % хорды. На боковых гранях применялись периодические граничные условия. Расчет выполнен неявным методом крупных вихрей (ILES) [4]. Численный расчет начинался с установившегося режима при угле атаки 10° . Далее проводилось вращение крыла до угла атаки 15° (выше критического угла атаки). При повороте крыла использовался синусоидальный закон изменения скорости вращения с максимальной амплитудой $25^\circ/\text{с}$.

В начале движения коэффициенты подъемной силы (CL), лобового сопротивления (CD) и продольного момента (относительно середины профиля) (CM) меняются слабо (см. рисунок, *a*). В районе линейного роста угла атаки CL растет линейно, CD — по степенному закону, CM убывает. При остановке вращения наблюдается существенное (в 1,5...2,0 раза) падение CL , снижение CD , а CM резко увеличивается — сопротивление увеличивается, а момент уменьшается.

После остановки течение вокруг профиля продолжает перестраиваться в течение примерно 200 мс.

© М. А. Акимов, П. А. Поливанов, 2023

а**б****в**

Изменение во времени угловой скорости вращения, угла атаки коэффициентов подъемной силы, силы лобового сопротивления и продольного момента (а), значения коэффициента давления в точке на поверхности крыла (б) и его амплитудный спектр (в)

Для определения режима обтекания использовались показания виртуального нестационарного датчика давления на поверхности крыла (см. рисунок, б) и спектр записанного им сигнала (см. рисунок, в). По изменению спектра пульсаций также можно косвенно определять режим обтекания профиля.

Список литературы

1. Raza A., Malik F.M., Mazhar N., Khan R. Two-time-scale robust output feedback control for aircraft longitudinal dynamics via sliding mode control and high-gain observer // Alexandria Eng. J. 2022 Jun 1. 61 (6). P. 4573–4583.
2. Dickinson M.H., Gotz K.G. Unsteady aerodynamic performance of model wings at low Reynolds numbers // J. Exp. Biol. 1993 Jan. 174 (1). P. 45–64.
3. Акимов М.А., Поливанов П.А. Исследование скачкообразного изменения подъемной силы на толстом каплевидном профиле при малых числах Рейнольдса // Теплофизика и аэромеханика. 2021. № 6. С. 849–853.
4. Puri K., Laufer M., Müller-Vahl H., Greenblatt D., Frankel S.H. Computations of active flow control via steady blowing over a NACA-0018 airfoil: implicit LES and RANS validated against experimental data // AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2018. P. 0792.

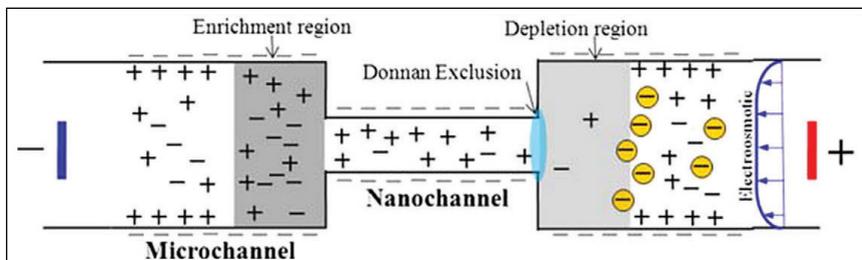
ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИИ СЛОЖНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА НА ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ В МИКРОКАНАЛАХ*

М.С. Алексеев, В.А. Попов, Г.С. Ганченко, Е.А. Демёхин

*Финансовый университет при Правительстве РФ
(Краснодарский филиал), 350051, Краснодар*

В докладе рассматривается проблема движения многокомпонентного электролита в микроканалах под воздействием внешнего электрического поля. Такое движение возникает, например, в микроустройствах, решающих задачи биомедицинских технологий. Одной из важных практических задач, стоящих перед такими устройствами, является необходимость обнаруживать и/или сепарировать макромолекулы, взвешенные в буферном растворе.

За последние годы в изучении указанной проблемы сложилась ситуация, когда теоретические исследования заметно отстают от экспериментальных. Еще десять лет назад в обзоре [1] указывалась необходимость развития методов прямого численного моделирования для решения как данной, так и смежных проблем микрофлюидики. Значительная часть работ по этой тематике выполнена коллективами под руководством Хана [2] и Мани [3], прямые численные методы предлагались также авторами настоящей работы [4]. Современные обзоры микро- и наночannelных систем [5] отмечают



Движение раствора электролита с взвешенными макромолекулами в окрестности стыка микро- и наночannelа (рисунок адаптирован из обзора [5])

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-29-00307).
© М.С. Алексеев, В.А. Попов, Г.С. Ганченко, Е.А. Демёхин, 2023

необходимость изучения сложных геометрических конфигураций, что свидетельствует о том, что теоретический пробел в данной области еще далек от заполнения.

В настоящей работе делается акцент на описании важного частного случая конфигурации микрофлюидного устройства — стыка микро- и наноканала с заряженными стенками (см. рисунок). Для обоих каналов предполагается малость характерного числа Рейнольдса, а отличием наноканала является то, что его толщина считается сопоставимой с толщиной дебаевского слоя (превышает ее менее чем на порядок или даже оказывается меньше) и с размером макромолекул, которые, в силу данного обстоятельства, не могут пройти через наноканал. Пример наноканалов — поры ионоселективной мембраны. Известно, что в окрестностях рассматриваемого стыка возникает завихренное течение жидкости, а в экспериментах возле него резко возростала концентрация макромолекул [6]. На практике заряд макромолекул обычно велик по сравнению с зарядом ионов буферного электролита, но в литературе эта ситуация пока не рассмотрена. В настоящем докладе показывается, что резкое различие зарядов не является необходимым для вытеснения ионов. Приводятся полученные численно профили концентраций и демонстрируются характеристики течения. Дается описание механизма вытеснения ионов буферного электролита макромолекулами.

Список литературы

1. Chang H.-C., Yossifon G., Demekhin E.A. Nanoscale electrokinetics and microvortices: How microhydrodynamics affects nanofluidic ion flux // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2012. Vol. 44. P. 401–426.
2. Pham V. S., Li Z., Lim K. M., White J. K., Han J. Direct numerical simulation of electroconvective instability and hysteretic current-voltage response of a permselective membrane // *Phys. Rev. E.* 2012. Vol. 86, № 4. 046310.
3. Druzgalski C. L., Andersen M. B., Mani A. Direct numerical simulation of electroconvective instability and hydro-dynamic chaos near an ion-selective surface // *Phys. Fluids.* 2013. Vol. 25, № 11. 110804.
4. Demekhin E. A., Nikitin N. V., Shelistov V. S. Direct numerical simulation of electrokinetic instability and transition to chaotic motion // *Phys. Fluids.* 2013. Vol. 25, № 12. 122001.
5. Han W., Chen X. A review: applications of ion transport in micro-nanofluidic systems based on ion concentration polarization // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2020. Vol. 95, № 6. P. 1622–1631.
6. Wei O., Ye X., Li Z., Han J. Deciphering ion concentration polarization-based electrokinetic molecular concentration at the micro-nanofluidic interface: theoretical limits and scaling laws // *Nanoscale.* 2018. Vol. 10, № 32. P. 15187–15194.

«ВИРТУАЛЬНАЯ ПТИЦА» — КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ САМОЛЕТОВ ТРАНСПОРТНОЙ КАТЕГОРИИ В ИНТЕРЕСАХ РАЗРАБОТКИ, ИСПЫТАНИЙ И СЕРТИФИКАЦИИ

С. А. Алексеев, М. С. Войтишина, И. В. Жихарева

*Филиал «Региональные самолеты»
ПАО «Корпорация Иркут», 115280, Москва*

Проблема обеспечения безопасности при эксплуатации воздушного судна (ВС) в условиях непрерывного роста сложности систем самолетов и высокого уровня требований авиационных властей является одной из важнейших при проектировании самолетов транспортной категории. Решение этой проблемы возможно на основе применения комплексного подхода к междисциплинарному моделированию бортового оборудования и систем ВС на всех этапах жизненного цикла вновь создаваемой и модернизируемой авиационной техники. Современный подход к проектированию, основанный на увеличении количества экспериментов и исследований в цифровой среде, начиная с самых ранних этапов проектирования, позволяет создавать мультидисциплинарные математические модели и исследовать вопросы как междисциплинарной интеграции разрабатываемых систем, так и интеграции цифрового оборудования для обеспечения отладки, а также взаимодействия бортового комплекса в целом.

Для решения обозначенной выше проблемы в рамках создания самолета SSJ-NEW разработан программно-моделирующий комплекс «Виртуальная Птица», основной целью которого является формирование цифрового облика разрабатываемых систем и агрегатов со стороны разработчика ВС параллельно с созданием поставщиками реального оборудования. Такой подход, с одной стороны, позволяет выполнять контроль поставщиков, а с другой — задолго до получения готовых образцов приводит к значительному повышению оперативности решения задач интеграции бортовых систем самолета, разрабатываемых различными поставщиками.

Программно-математический комплекс «Виртуальная Птица» представляет собой четыре исполнения математических моделей, связанных между собой требованиями к системам и функциями систем разного уровня, соответствующих этапам разработки ВС.

© С. А. Алексеев, М. С. Войтишина, И. В. Жихарева, 2023

Исполнение первого уровня представляет собой архитектурные и функциональные («спецификационные») модели, трассируемые между собой. Такое представление первого исполнения позволяет валидировать функциональные требования в соответствии с рекомендациями руководства R4754A, что, в свою очередь, закладывает основу для требований по отказобезопасности и обеспечивает сертифицируемость разрабатываемых решений в будущем.

Исполнение второго уровня представляет собой «предпроектные» математические модели систем, интегрированные между собой в рамках модели ВС. Исполнение «предпроектных» моделей отражает функционирование систем и позволяет проводить симуляцию их работы, в том числе и исследования взаимного влияния их функционирования.

Исполнение третьего уровня «проектных моделей» предназначено в первую очередь для формализации требований к ПО бортовых систем, на этом уровне модели систем рассматриваются с точки зрения алгоритмов, обеспечивающих выполнение разработанных законов управления на реальной архитектуре системы.

Исполнение четвертого уровня, в дополнение к первым трем исполнениям, учитывает характеристики базового ПО, влияющего на работу функционального ПО систем, и другие важные аспекты реализации работы бортового оборудования, оказывающие влияние на работу систем в составе ВС.

Таким образом, описываемый программно-математический комплекс «Виртуальная Птица», начиная с ранних этапов проектирования, позволяет осуществлять проверку функционирования проектируемых бортовых систем, в том числе и в условиях их интеграции в составе ВС, и приводит к уменьшению количества необходимых корректировок и изменений на стадии прототипов. С учетом большого количества цифровых бортовых систем, имеющих в своем составе ПО, комплекс «Виртуальная Птица» позволяет четко формализовать, валидировать и верифицировать требования различных уровней, что приводит к прозрачности процессов квалификации бортового ПО в соответствии с КТ-178 и соответствующими дополнениями в части модельно-ориентированной разработки. При этом использование комплекса «Виртуальная Птица» не ограничивается этапом разработки и может происходить на всех этапах жизненного цикла ВС, в том числе для решения задач, возникающих в эксплуатации и при расследовании авиационных происшествий.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ НА СТРУКТУРУ ОБТЕКАНИЯ ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ МОДЕЛИ КРЫЛА*

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

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Изучение структуры течения на крыле представляет собой актуальную задачу. Влияние распределенной силовой установки на обтекание верхней поверхности крыла — один из новых и неизученных вопросов науки. Данное исследование направлено на получение данных о структуре течения на верхней поверхности крыла с влиянием распределенной силовой установки.

Исследования проводились на трапециевидной модели крыла. Центральная хорда составляла 500 мм, концевая — 250 мм. Угол между передними кромками 112° . Распределенная силовая установка представляет собой 6 двигателей (импеллеров). Двигатели располагались позади модели на державке, которая спроектирована так, чтобы была возможность изменять угол атаки модели вместе с двигателями. Модель и двигатели спроектированы своими силами и распечатаны на 3D-принтере.

Эксперименты проведены на дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ им. С. А. Христиановича СО РАН (рис. 1). Эта труба замкнутого типа имеет закрытую рабочую часть квадратного сечения 1×1 м и длину 4 м, с уровнем турбулентности потока менее 0,04 %. Предназначена для экспериментов при малых дозвуковых скоростях потока — примерно 70 м/с. Модель продувалась на углах атаки в диапазоне от 5° до 20° . Особенностью этой части работы является то, что модель продувалась при натуральных (полетных) числах Рейнольдса. Скорость набегающего потока равна 25 м/с, $Re = 6,5 \cdot 10^5$. Число Рейнольдса считалось по $\frac{1}{4}$ хорде крыла. Данные о структуре и характере течения на верхней поверхности модели получены методом саже-масляной визуализации.

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 22-29-00309), <https://rscf.ru/project/22-29-00309>.

© Н. С. Алпацкий, А. М. Павленко, Е. А. Мельник, Б. Ю. Занин, В. С. Каприлевская, 2023



Рис. 1. Модель крыла с двигателями в аэродинамической трубе

В результате проведенных экспериментов по изучению влияния двигателей на структуру течения на модели крыла трапециевидной формы были получены картины течения на различных углах атаки, а также проведено сравнение структуры течения с включенными и заблокированными двигателями (рис. 2).

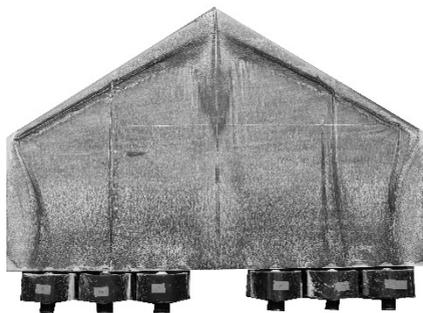


Рис. 2. Результаты саже-масляной визуализации на угле атаки 14° и с включенными двигателями

Список литературы

1. Павленко А. М., Занин Б. Ю., Катасонов М. М. Исследования обтекания модели летающего крыла при натуральных числах Рейнольдса // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10.

КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС ЧАСТИЦ И ФОРМИРОВАНИЕ ПАТТЕРНОВ НА ПОДЛОЖКАХ: ВЛИЯНИЕ КРИВИЗНЫ МЕНИСКА СМАЧИВАНИЯ*

М. Аль-Музайкер, Н. А. Иванова

Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень

Манипулирование микро- и наночастицами в жидких средах с целью создания упорядоченных структур на твердых подложках важно в химических и биомедицинских исследованиях [1, 2], изготовлении новых материалов [3], создании функциональных покрытий [2], технологии очистки поверхности [4] и сохранении объектов культурного наследия [5].

В данной работе сообщаем о новом подходе к управлению переносом микро- и наночастиц, который основан на контроле характера течения несущей жидкости при спонтанной испарительной конвекции Марангони в области менисков смачивания, образующихся в углах между бортиками ячейки (см. рисунок, *а*). Структура течения, в свою очередь, задается кривизной мениска смачивания.

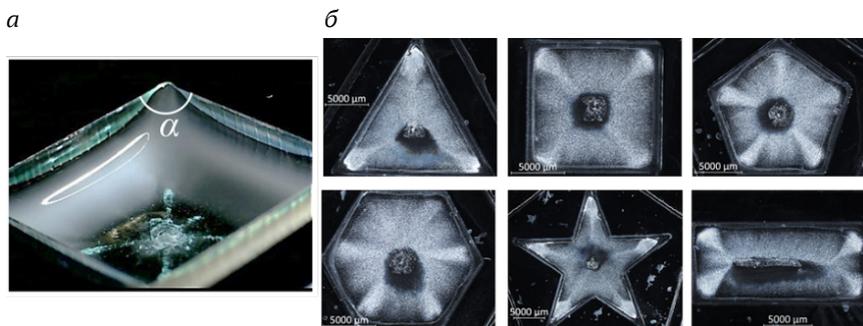


Иллюстрация мениска смачивания, образующегося между бортиками ячейки под углом α (*а*), и влияние кривизны мениска смачивания на конечный паттерн частиц (полистирола, 10 мкм) при испарительной конвекции (*б*).

Частицы полистирола (10 мкм) в слое изопропанола

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы НЦМУ «Передовые цифровые технологии» (контракт № 075-15-2020-935) и программы развития университета «Приоритет-2030» в Центре природовдохновленного инжиниринга.

© М. Аль-Музайкер, Н. А. Иванова, 2023

Известно, что кривизна и высота мениска смачивания между двумя вертикальными плоскостями зависит от угла между ними. Таким образом, создание ячеек с определенной геометрией стенок (n-гоны и произвольные фигуры), ограничивающих слой суспензии, позволит задать определенное поле течения жидкости и, как следствие, сформировать заданные распределения частиц (паттерны).

Предварительные эксперименты данного подхода были проведены для дисперсных систем частиц полистирола PS (размер от 200 нм до 10 мкм) в изопропанолe с ячейками, стенки которых были выполнены в форме звезды, треугольника, квадрата и пятиугольника, как показано на рисунке. На снимках хорошо видно, что характер получаемых паттернов зависит от угла между сторонами ячейки.

Уникальность данного подхода заключается в том, что формирование желаемой морфологии паттерна частиц возможно на большой (до нескольких квадратных сантиметров) площади за счет самоструктурирования конвективных потоков, образования диссипативных конвективных ячеек в тонких слоях дисперсных систем при спонтанном испарении жидкости-носителя.

Список литературы

1. Das S. et al. Harnessing catalytic pumps for directional delivery of microparticles in microchambers // *Nat. Commun.* 2017. № 14384.
2. Hammond P.T. Building biomedical materials layer-by-layer // *Mater. Today.* 2012. Vol. 15, № 5. P. 196–206.
3. Vlasov Y. et al. On-chip natural assembly of silicon photonic bandgap crystals // *Nature.* 2001. Vol. 24, № 21. P. 12150–12157.
4. Ivanova N. et al. Removal of micrometer size particles from surfaces using laser-induced thermocapillary flow: experimental results // *J. Colloid Interface Sci.* 2016. Vol. 473. P. 120–125.
5. Freydier P. et al. Vermiculations in painted caves: new inputs from laboratory experiments and field observations // *Int. J. Speleology.* 2021. Vol. 2050, № 3. P. 289–299.

С. А. ХРИСТИАНОВИЧ — УЧЕНЫЙ-УНИВЕРСАЛ

Г. А. Амирьянц

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)*

Выдающийся ученый-механик академик Сергей Алексеевич Христианович по образованию был математиком (Ленинградский университет). В отличие от «чистого» математика академика С. Л. Соболева, он, как и два других их общих однокашника, экономист Л. В. Канторович и астроном В. А. Амбарцумян, был выдающимся математиком-прикладником. Христианович — прежде всего крупный теоретик в ряде связанных чисто математически (а также никак не связанных) областей механики: аэрогазодинамике, механике ядерного взрыва, теории упругости, теории пластичности, теории фильтрации, теории гидроразрыва. Но он многое сделал также в области «чистого» эксперимента: был одним из создателей выдающихся около- и сверхзвуковых аэродинамических труб Т-106, -108, -109, -112, -113 ЦАГИ, одним из первопроходцев в революционном использовании перфорации АДТ как средства плавного перехода к сверхзвуковым скоростям потока в АДТ, в становлении метрологии как основы научного эксперимента.

Решение фундаментальных научных проблем было связано у Сергея Алексеевича с наиболее насущными потребностями страны и нередко завершалось выдающимися достижениями в области инженерно-технической мысли. Неоценима роль Христиановича в создании ряда конкретных образцов передовой авиационно-ракетной техники: ракетных установок «Катюша», самолетов МиГ-15, -17, -19, Ту-16, М-4, Ту-95, Ту-16, крылатых ракет стратегического назначения «Буря» и «Буран», в разработке революционных энергетических парогазовых установок, в предложениях, направленных на повышение эффективности разработки нефтяных и газовых месторождений.

Уникален талант Христиановича как организатора науки. Истинный государственный деятель, он был инициатором создания МФТИ, СОАН, ИТПМ, не оценим его вклад в развитие ЦАГИ, Всесоюзного НИИ физико-технических и радиоизмерений (ВНИИФТРИ), Всесоюзного НИИ радиоизмерений (ВНИИРИ).

При всех своих заслугах Сергей Алексеевич был на редкость скромным человеком. Свои шесть орденов Ленина он показал миру единственный раз, появившись с ними в свитере на публике. Сейчас его многочисленные награды хранятся в Историческом музее. А в памяти его близких учеников и сподвижников он остался как истинный гений механики.

ВОПРОСЫ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ*

К. Ю. Арефьев, М. А. Абрамов

*Московский физико-технический институт, 141701,
Долгопрудный (Московская область)*

В работе представлены современные подходы к физическому и математическому моделированию двухфазных течений с учетом различных теплофизических и газодинамических эффектов.

Предложены статистические модели и принципы преобразования дискретных траекторий отдельных частиц в локально непрерывное поле раскодонапряженности дисперсной фазы.

Получены экспериментальные закономерности энерговыделения и энергопоглощения в двухфазных потоках, а также преобразования структуры течения и дисперсного распределения дискретной фазы при наличии газодинамических особенностей и ударно-волновой структуры.

Разработаны математические модели, описывающие движение и горение частиц и капель конденсированной фазы в одномерной и многомерной постановках.

Для двухфазных высокоэнталийных газочапельных течений установлены характерные зависимости параметров интенсивности газодинамического дробления, испарения, инициирования макрокинетических процессов от скоростных и энергетических условий течения.

Показаны тенденции протекания гетерогенных макрокинетических процессов в условиях трехфазной среды при различных полных энтальпиях потока. Сформулированы критерии, определяющие качество смешения двухфазных потоков и интенсивность их эрозионного воздействия на преграду. Для сравнения интенсивности воздействия частиц конденсированной фазы на преграду в работе использованы критерии, основанные на анализе распределения импульса попадающих на стенку частиц, и плотность потока энергии при единичном ударе частиц.

Полученные результаты фундаментальных исследований могут являться базисом для валидации и верификации математических и компьютерных моделей многофазных течений.

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (№ МД-1814.2022.4).
© К. Ю. Арефьев, М. А. Абрамов, 2023

ВЛИЯНИЕ ВОСХОДЯЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУХА НА ГРАВИТАЦИОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ КЛАСТЕРА КАПЕЛЬ*

В. А. Архипов, С. А. Басалаев, Н. Н. Золоторёв,
К. Г. Перфильева, А. С. Усанина

Томский государственный университет, 634050, Томск

Лесные пожары создают серьезную угрозу окружающей среде. Современные системы мониторинга окружающей среды позволяют с высокой точностью определить очаг возгорания и площади поражения пожаром. Важным фактором является эффективность самих систем пожаротушения. В частности, одна из актуальных задач — определение оптимальных параметров сброса хладагента из сливного устройства летательного аппарата в очаг пожара, обеспечивающих высокую эффективность технологии авиационного пожаротушения [1]. Одним из важных факторов, определяющих динамику осаждения жидкокапельного облака хладагента, является влияние восходящего потока воздушных масс (конвективной колонки) на осаждение кластера капель. Исследованию динамики осаждения кластера частиц посвящено ограниченное количество публикаций, связанных с движением облака твердых частиц [2]. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования эволюции кластера монодисперсных частиц при гравитационном осаждении при воздействии внешнего восходящего потока воздуха — качественная картина изменения конфигурации кластера частиц и скорости осаждения его центра масс.

Список литературы

1. Асовский В. П. Особенности тушения лесных пожаров вертолетами с использованием подвесных водосливных устройств // Науч. вестн. МГТУ ГА: Аэромеханика и прочность. 2009. № 138. С. 142–149.

2. Архипов В. А., Васенин И. М., Усанина А. С., Шрагер Г. Р. Динамическое взаимодействие частиц дисперсной фазы в гетерогенных потоках. Томск: Изд. дом ТГУ, 2019.

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 22-19-00307).

© В. А. Архипов, С. А. Басалаев, Н. Н. Золоторёв, К. Г. Перфильева, А. С. Усанина, 2023

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ДЕТОНАЦИИ В ВОДОРОДНЫХ ВЗВЕСЯХ С ЧАСТИЦАМИ АЛЮМИНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ*

А. А. Афанасенков, Т. А. Хмель

*Институт теоретической и прикладной механики им.
С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Аннотация. С развитием численных методов для решения задач моделирования физических процессов с высокой точностью возрастают требования к вычислительным мощностям. Благодаря технологиям параллельного программирования можно значительно ускорить вычисления при решении задач детонации многофазных сред. Данная работа посвящена численному моделированию с использованием параллельного программирования на основе библиотеки OpenMP и исследованию развития и распространения ячеистой детонации в гибридной взвеси частиц алюминия и водорода в окислительной среде.

Физико-математическая модель. Физико-математическая модель показана в работе [1]. Основные уравнения вытекают из законов сохранения массы, импульса и энергии, дополняются уравнением состояния идеального газа. Горение водорода и алюминия представлено уравнениями приведенной кинетики [2, 3]. Замыкание модели описано законами теплообмена и сопротивления частиц с учетом сверхзвукового обтекания.

Постановка задачи. Рассматривается задача инициирования детонации в плоском канале при разрушении камеры высокого давления и развитии ячеистой детонации в смеси частиц алюминия, водорода и кислорода (разбавленного аргоном или азотом).

Численный метод. Для расчета уравнений газовой фазы используется явная TVD-схема Хартена — Лакса 2-го порядка аппроксимации, а для расчета дискретных фаз — схема 2-го порядка точности Джентри — Мартина — Дейли. Для распараллеливания расчетов (в том числе и наиболее затратных схем TVD и Джентри — Мартина — Дейли, включающих в себя большое количество логических операций) применялась библиотека OpenMP [4].

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научно-го проекта № 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>.

© А. А. Афанасенков, Т. А. Хмель, 2023

Анализ эффективности применения параллельных технологий.

Анализ эффективности и прироста производительности проводился на тестовых задачах с длиной канала 1,6 м и шириной 0,0005 м, шаг сетки 0,0001 м. Результаты тестовой задачи показали, что максимальное ускорение расчетов (в 3 раза) достигается на 8 ядрах, но наиболее эффективно проводить расчеты на 4 ядрах. При этом конечный результат не меняется.

Полученные результаты. Изучены процессы формирования и распространения ячеистой детонации в смеси $0,36 \text{ H}_2 + \text{O}_2 + 2,58 \text{ Ar}$ при начальном давлении 0,26 атм с добавками частиц алюминия размером 3,5 и 5 мкм. Получены картины развития ячеистой детонации в плоском канале 10 см, проанализированы скорости детонации, размеры ячеек и их зависимости от загрузки частиц алюминия. Установлено, что добавка даже малого количества частиц алюминия способствует стабилизации течения. Характер ячеек меняется от слаборегулярной в газовой смеси до регулярной в гибридной смеси. В установившемся режиме распространения скорость фронта, пиковые давления и температуры гибридной детонации выше, а размер ячейки меньше, чем в газовой детонации. Установлено увеличение скорости от 1,47 км/с в газе до 1,67 км/с в гибридной смеси. Показано уменьшение размера ячеек при изменении средней плотности частиц алюминия от 10 до 50 г/м³. Результаты указывают на возможность управления детонационными процессами в газовых смесях путем добавления малого количества мелкодисперсных частиц алюминия.

Список литературы

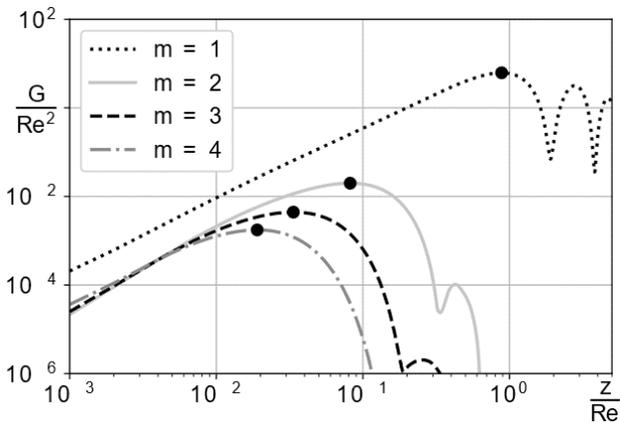
1. Khmel T.A., Lavruk S.A. Development of a model of hybrid detonation in a mixture of oxygen–hydrogen–argon and aluminum particles // *Combust. Explosion*. 2023. Vol. 16, № 1. P. 17 – 23.
2. Fedorov A.V., Khmel T.A. Numerical simulation of formation of cellular heterogeneous detonation of aluminum particles in oxygen // *Combust. Explosion. Shock Waves*. 2005. Vol. 41 (4). P. 435–448.
3. Bedarev I.A., Rylova K.V., Fedorov A.V. Application of detailed and reduced kinetic schemes for the description of detonation of diluted hydrogen–air mixtures // *Combust. Explosion. Shock Waves*. 2015. Vol. 51 (5). P. 528–539.
4. Антонов А. С. Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP: моногр. / Моск. гос. ун-т им. Ломоносова. М., 2009. 76 с.

ОПТИМАЛЬНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В КРУГЛЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЯХ*

Д. А. Ашуров

Научно-исследовательский институт механики МГУ
им. М. В. Ломоносова, 119192, Москва

В работе численно изучается развитие немодальных возмущений [1] в осесимметричных затопленных струях для различных значений параметров: числа Рейнольдса, частоты возмущения, формы профиля скорости струи. Для каждого набора параметров первоначально решается задача на собственные значения — находятся собственные функции и отвечающие им собственные значения. После этого произвольное возмущение представляется в виде разложения по собственным функциям. Для определения коэффициентов разложения решается оптимизационная задача [1] — максимизация кинетической энергии возмущений для фиксированного положения вниз по потоку (при условии нормировки в начальном сечении струи). Строя такие возмущения, можно определить глобально оптимальное возмущение, достигающее максимума кинетической энергии среди всех возмущений для всех положений вниз по потоку.



Энергия стационарных оптимальных возмущений
для профиля струи Михалке ($\theta = 0,05$) [2]

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (№ 20-19-00404).

© Д. А. Ашуров, 2023

Полученные результаты свидетельствуют о возможности значительно немодального роста энергии возмущений в струях для различных азимутальных волновых чисел [3]. Приведены графики энергий оптимальных возмущений как функций координаты вдоль потока и частоты возмущения. Проанализирована структура оптимальных возмущений для различных значений азимутального волнового числа.

Список литературы

1. Boronin S.A., Healey J. J., Sazhin S. S. Non-modal stability of round viscous jets // J. Fluid Mech. 2013. Vol. 716. P. 96–119.
2. Michalke A. Survey on jet instability theory // Prog. Aerospace Sci. 1984. Vol. 21. P. 159–199.
3. Jimenez-Gonzalez J. I., Brancher P. Transient energy growth of optimal streaks in parallel round jets // Phys. Fluids. 2017. Vol. 29, № 11. P. 114101.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК-МОДИФИКАТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ТОПЛИВ

Н. С. Белоусова^{1,2}, О. Г. Глотов^{1,2}, А. В. Гуськов²

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

²Новосибирский государственный
технический университет, 630073, Новосибирск

Объектами исследования являются модельные смесевые топлива, состоящие из перхлората аммония (ПХА $\approx 60\%$), алюминия ($\approx 20\%$), связующего ($\approx 20\%$) и включающие опционально добавку-модификатор (1,0–3,5 % сверх 100 %). Компоненты: ПХА — ситовая фракция 500–630 мкм либо 180–250 мкм; Al — АСД-4; связующее — МПВТ [1, 2]; добавка: TiB_2 , $AlMgB_{14}$, $(NH_4)_2TiF_6$, NH_4BF_4 , $Ca_3(PO_4)_2$.

Эксперименты проводили в малогабаритном сосуде высокого давления (бомбе) в азоте при давлении 0,35 МПа. Бомба имеет объем 0,33 л, рассчитана на давление до 3 МПа системой контроля давления и предназначена для отбора конденсированных продуктов горения (КПГ) в жидкость. При сжигании исследуемого образца (5 × 5 мм) проводится видеосъемка процесса горения и отбор КПГ в сосуд с дистиллированной водой объемом 100 мл, помещенный внутрь бомбы.

В результате экспериментов определены масса частиц-агломератов крупнее 80 мкм, их полнота сгорания, функции распределения частиц КПГ по размерам и средние размеры частиц. Некоторые из обнаруженных эффектов представляют практической интерес с точки зрения управления скоростью горения и улучшения характеристик КПГ. Сделан вывод о том, что работу по поиску новых добавок, способных понизить интенсивность агломерации, необходимо продолжить.

Список литературы

1. Кижняев В.Н., Голобокова Т.В., Покатилов Ф.А., Верещагин Л.И., Эстрин Ю.И. Синтез энергичных триазол- и тетразолсодержащих олигомеров и полимеров // Химия гетероциклических соединений. 2017. Т. 53, № 6/7. С. 682–692.
2. Архипов В.А., Горбенко Т.И., Жуков А.С., Пестерев А.В. Влияние хлорида олова на скорость горения гетерогенных конденсированных систем // Химическая физика и мезоскопия. 2011. Т. 4. С. 463–469.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РАМЫ КВАДРОКОПТЕРА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ НА ВИНТЕ

Г.А. Беркон, В.В. Маркин, П.А. Поливанов

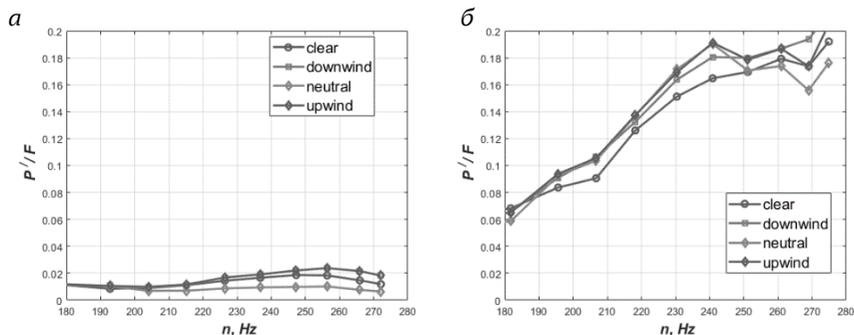
*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

В последние десятилетия широкое распространение получили беспилотные летательные аппараты мультироторной схемы. Перспективы их развития предполагают использование мультикоптеров для выполнения различных задач, в том числе в условиях городской застройки и высокой плотности населения. В связи с этим встает вопрос обеспечения безопасности полетов БПЛА данного типа. Основным элементом мультикоптера, обеспечивающим его управляемый полет, является воздушный винт постоянного шага. Особенности конструкции мультикоптеров предполагают работу винта вблизи препятствия (балки, на которой крепится двигатель с несущим винтом, обычно называемой «луч»), зачастую плохообтекаемого. Работа винта в условиях такого локального загромождения потока, вероятно, должна приводить к возникновению динамических нагрузок на лопастях в результате интерференции между винтом и лучом [1]. В свою очередь, это может привести к ускорению износа винтомоторной группы и повышению аварийности. Целью этой работы является определение существенности динамических нагрузок на винте, работающем вблизи препятствия.

Эксперименты проводились на дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН с рабочей частью $1 \times 1 \times 4$ м, при фиксированной скорости потока $V_\infty = 10$ м/с. Винтомоторная группа крепилась на альфа-механизм, который позволял менять угол между осью винта и набегающим потоком в диапазоне $\theta = 0^\circ - 60^\circ$, что обеспечивало моделирование различных режимов полета. На механизме устанавливались шестикомпонентные весы FTD MINI40, с помощью которых можно измерять частоты до 1 кГц. В работе исследовался воздушный винт постоянного шага диаметром 7 дюймов (GEMFAN 7042R). За плоскостью вращения винта на расстоянии 24 мм располагалось препятствие, имитирующее «луч» мультикоптера (элемент рамы). Препятствие представляло собой балку прямоугольного сечения, размерами $70 \times 12 \times 10$ мм. Были осуществлены продувки без препятствия,

а также при различных положениях препятствия относительно фазы вращения винта.

На рисунке представлены кривые зависимости относительной амплитуды пульсаций тяги винта от частоты его вращения для четырех вариантов расположения препятствия: без препятствия (*clear*), под отступающей лопастью (*downwind*), вектор окружной скорости лопасти перпендикулярен вектору скорости набегающего потока (*neutral*), под наступающей лопастью (*upwind*). Видно, что при осевой обдувке винта (см. рисунок, а) существенного эффекта от препятствия не наблюдается, амплитуды пульсаций для всех случаев лежат в диапазоне 2 % от средней силы, генерируемой винтом. В случае косой обдувки (см. рисунок, б) наблюдается небольшая разница между кривыми, соответствующими продувкам с препятствием и без него. Анализ данных показал более существенное влияние угла обдувки θ на нестационарные характеристики тяги винта, чем исследуемое препятствие. Полученный результат противоречит данным, найденным в работе [2], и требует дальнейшего исследования.



Амплитуда пульсаций силы тяги P' , отнесенная к средней результирующей силе на винте F , в зависимости от частоты вращения: а — $\theta = 0^\circ$; б — $\theta = 45^\circ$

Список литературы

1. Yener S., Perçin M. A computational study on rotor-propeller arm interaction in hovering flight // Ankara Int. Aerospace Conf. (AIAC-2019). 18–20 sep. 2019. Ankara, Turkey.
2. Markin V. V., Polivanov P. A. Experimental study of unsteady forces on a propeller working near an arm // XXI Int. Conf. Meth. Aerophys. Res. (ICMAR-2022), Novosibirsk, 8–14 Aug. 2022. Novosibirsk: SB RAS, 2022. P. 106–107. Abstr. Pt. II.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОВЕРХНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВСПЛЫТИЯ ПУЗЫРЬКОВ*

С. Богданов, В. А. Архипов, А. С. Усанина

Томский государственный университет, 634050, Томск

Пузырьковые или газожидкостные течения встречаются во многих технологических процессах и технических устройствах [1–3]. В качестве примера можно привести процесс обогащения полезных ископаемых на промышленных предприятиях методом флотации, устройства и технологии, основанные на кавитации, процесс барботажа в химической технологии.

Одним из параметров, влияющих на динамику движения пузырькового двухфазного потока, является сила поверхностного натяжения на границе раздела газ — жидкость. Во многих промышленных процессах для изменения свойств свободной поверхности в дисперсионную среду вводят добавку — поверхностно-активное вещество. Введение поверхностно-активного вещества в жидкость приводит к изменению параметров границы раздела сред (коэффициент поверхностного натяжения, мобильность межфазной границы, форма) и динамических характеристик (скорость, коэффициент сопротивления, траектория, след) всплытия пузырьков в двухфазном потоке.

Цель настоящей работы — выявление основных закономерностей всплытия одиночного пузырька и совокупности газовых пузырьков в присутствии поверхностно-активного вещества разной концентрации в жидкости.

Экспериментальная установка состоит из кюветы с жидкостью, устройства для подачи пузырьков и системы визуализации исследуемого процесса. Кювета с плоскопараллельными стенками изготовлена из прозрачного оргстекла. Подробное описание устройства для создания группы пузырьков дано в [4]. Система визуализации процесса всплытия пузырьков включает две видеокамеры (цифровая видеокамера Nikon D600 и скоростная видеокамера Phantom V2640), расположенные в двух перпендикулярных плоскостях вдоль экспериментальной кюветы.

В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода. Эксперименты проведены для анионного поверхностно-активного вещества — лаурилсульфата натрия (COLEAN SLS 94, активное вещество 95 %).

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 22-79-10028), <https://rscf.ru/project/22-79-10028/>.

© С. Богданов, В. А. Архипов, А. С. Усанина, 2023

Получены новые экспериментальные данные по скорости всплытия одиночного пузырька и совокупности пузырьков воздуха в зависимости от концентрации поверхностно-активного вещества в жидкости. Показано снижение скорости всплытия пузырьков в жидкости, содержащей поверхностно-активное вещество, по сравнению со скоростью пузырька, всплывающего в «чистой» жидкости (в отсутствие поверхностно-активного вещества). Обнаружено изменение формы пузырька при введении поверхностно-активного вещества в жидкость. Проанализировано влияние концентрации поверхностно-активного вещества на границе раздела фаз на динамику движения пузырьков.

Список литературы

1. Бошнятов Б. В. Гидродинамика микропузырьковых газожидкостных сред // Изв. Том. политехн. ун-та. 2005. Т. 308, № 6. С. 156–160.
2. Донцов В. Е. Процессы растворения и гидратообразования за ударной волной в жидкости с пузырьками из смеси азота и углекислого газа при наличии поверхностно-активного вещества // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 1. С. 89–101.
3. Трушин А. М., Дмитриев Е. А., Акимов В. В. Механика образования микропузырьков при диспергировании через поры микрофильтрационных мембран // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45, № 1. С. 28–34.
4. Пат. 2670228 РФ. Устройство для создания компактного кластера монодисперсных пузырьков / В. А. Архипов, С. А. Басалаев, А. С. Усанина, К. Г. Перфильева, С. Н. Поленчук, В. И. Романдин. 2017. Бюл. № 29. С. 15.

ПОЛОСЧАТЫЕ СТРУКТУРЫ В ПРИСТЕННЫХ ТЕЧЕНИЯХ*

А. В. Бойко

*Институт вычислительной математики
им. Г. И. Марчука РАН, 119333, Москва*

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

При высокой степени турбулентности потока обычно выделяют два основных явления, заложенных в основу турбулизации сдвиговых течений [1–4]: генерацию бегущих волн с характеристиками, определяемыми локальными свойствами неустойчивости течения, и возникновение квазистационарных полосчатых (продольных) структур, формирующихся, например, под действием внешних вихревых возмущений. Полосчатые структуры, получившие свое название по результатам визуализации течений, наблюдаются в виде квазистационарных трехмерных деформаций ламинарного сдвигового слоя, интенсивность и пространственная протяженность которых растет вниз по потоку.

Установлено, что такие структуры — это стационарные или квазистационарные модуляции преимущественно продольной компоненты скорости сдвигового потока в трансверсальном направлении, возникающие в ближней зоне источников различных возмущений (не только при высокой степени турбулентности потока). Причиной их возникновения является так называемый механизм опрокидывания вихря, который имеет место в большинстве сдвиговых течений.

Доклад представляет собой обзор по рассматриваемой проблеме, обсуждаются подходы к описанию полосчатых структур и их влиянию на ламинарно-турбулентный переход, способы их экспериментального моделирования и управления их развитием.

Список литературы

1. Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В. Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях. М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2006. 304 с.
2. Boiko A. V., Dovgal A. V., Grek G. R., Kozlov V. V. Physics of transitional shear flows. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 272 p.

* Работа поддержана РФФ (грант № 22-11-00025).

© А. В. Бойко, 2023

3. Бойко А. В., Довгаль А. В., Козлов В. В., Сорокин А. М. Устойчивость пространственно-периодических и модулированных во времени локальных отрывных течений // Прикладная механика и техническая физика. 2021. Т. 62, № 3. С. 25–37.

4. Бойко А. В. Полосчатые структуры: фактор турбулизации сдвиговых течений // XX Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 13–16 февраля 2017 г. Тез. докл. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2017. С. 54.

ПРЕПЯТСТВИЕ КАК ИНИЦИАТОР ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ ЗАТУХАЮЩИМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

А. А. Борискин, А. А. Васильев

*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Новосибирск
Новосибирский государственный университет,
630090, Новосибирск*

Проблема перехода горения в детонацию (ПГД) является одной из актуальных проблем современной физики горения и взрыва. Понимание механизма ПГД важно по двум основным причинам. Во-первых, для предотвращения появления и развития детонационных волн в случае возникновения очага возгорания при аварии (например, в угольных шахтах и газопроводах). Во-вторых, знание механизма ПГД позволит оптимизировать условия инициирования детонации. Так, за счет отражения фронта пламени от стенок канала сложной структуры или от дополнительных препятствий в самом канале можно будет добиться самоподдерживающегося режима детонации при меньшей энергии инициирования. Управляемый процесс ПГД, к примеру, может быть использован при разработке импульсных детонационных двигателей.

Затухающая ударная волна (УВ) создавалась с помощью метода дифракции детонационной волны (ДВ) при переходе из узкого канала в широкий. При дифракции ДВ трансформируется в УВ в момент срыва реакции за точкой схождения поперечных волн на оси канала (рис. 1).

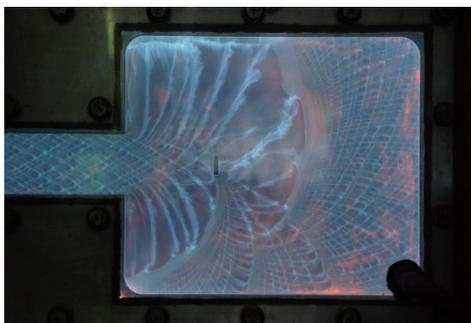


Рис. 1. Пример срыва ДВ и образования затухающей УВ

Оценки с помощью задачи о распаде произвольного разрыва показывают, что в момент срыва реакции фронт дифрагирующей волны представляет собой примерно полуокружность. Поскольку инициатор, которым здесь является детонационная волна, сильный, а фронт дифрагирующей волны примерно полуокружность, то можно рассматривать эту задачу в приближении теории сильного взрыва.

В теории сильного взрыва (Л.И. Седов) зависимость координаты УВ от времени определяется начальной плотностью газа и энергией взрыва в виде $r = (E_0 / \alpha_v \rho_0)^{1/(v+2)} t^{2/(v+2)}$ для плоского, цилиндрического и сферического случая, α_v — численный коэффициент. Скорость УВ получается дифференцированием координаты по времени: $D = dr / dt = (E_0 / \alpha_v \rho_0)^{1/(v+2)} \cdot [2 / (v+2)] \cdot t^{-v/(v+2)}$. Для цилиндрически расходящейся УВ получаем $D r = 0,5 (E_0 / \alpha_v \rho_0)^{1/2} = \text{const}$. Из решения задачи о распаде разрыва после срыва химической реакции в точке r^* закон дальнейшего затухания ударной волны описывается формулой $D(r) \approx 0,66 D_0 r^* / r$. С ее помощью можно определить такие газодинамические параметры в точке r установки препятствия, как температуры за падающей и отраженной УВ, превышение температуры самовоспламенения которых характеризует границы возможного инициирования ДВ за затухающей УВ. Одновременно оценивались задержки воспламенения при отражении. На рис. 2 приведена фотография реинициирования детонации при отражении УВ от препятствия (вниз от препятствия). Полученные расчетные данные сопоставлены с результатами эксперимента.

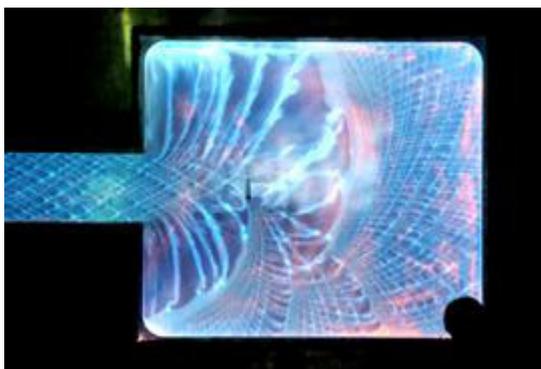


Рис. 2. Реинициирование детонации от препятствия

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ОТСЕКА КРЫЛА С ШАЙБАМИ И ОЦЕНКА ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В. Г. Борисова, В. А. Силантьев

*Сибирский научно-исследовательский институт авиации
им. С. А. Чаплыгина, 630051, Новосибирск*

При аэродинамическом проектировании самолета очень важно уже на предварительных этапах правильно выбрать профилировку крыла. К аэродинамическим характеристикам профилей часто предъявляются очень специфические требования, которые не удается удовлетворить с использованием известных профилей. Поэтому во многих случаях под конкретные самолеты проектируются специальные профили. Проектирование профилей под заданные характеристики в настоящее время проводится различными численными методами, которые базируются в том числе и на осредненных уравнениях Навье — Стокса (с различными моделями турбулентности). Несмотря на высокое совершенство таких методов, в конечных результатах требуется экспериментальная проверка полученных результатов.

Для этих целей лучше всего подходят аэродинамические трубы с закрытой рабочей частью (особенно специализированные). Но и в этом случае необходимо вводить различные поправки на ограниченность потока. В нашем случае такие трубы отсутствуют и исследование аэродинамических характеристик профилей проводится в дозвуковых трубах с открытой рабочей частью на отсеках крыльев с концевыми шайбами. Тогда поправки на ограниченность потока оказываются очень большими, и не всегда их можно корректно определить. Метод подходит для сравнительной оценки аэродинамических характеристик исследуемых профилей.

При переходе к аэродинамическим характеристикам профилей в безграничном потоке необходимо исключить аэродинамические нагрузки на шайбе (а они могут иметь относительно большие размеры), ввести поправки на индукцию трубы и аэродинамическое влияние шайб на обтекание отсека. Положительное влияние шайб — выравнивание нагрузки по размаху отсека, т. е. течение практически двухмерное. В отличие от обтекания профиля в безграничном потоке, имеет место индуктивный скос от пелены свободных вихрей (в основном от свободных вихрей за задними кромками шайб) и связанное с ним индуктивное сопротивление. Индуктивный скос зависит

от относительных размеров шайб, а экспериментально определить его затруднительно. Поэтому для этих целей использовались расчетные методы.

Для изучения этого влияния в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости были проведены расчетные исследования изолированного крыла с удлинением $\lambda = 1,6$, сформированного набором профилей НАСА 662-415, и его варианта с концевыми эллиптическими шайбами. Вычисление интегральных и распределенных аэродинамических характеристик выполнялось по методу возмущенного потенциала (методу Морино), реализованному в программе AEROJET [1].

Благодаря снижению величины скосов (в 1,5 раза) на крыле после установки шайб, наблюдается рост коэффициента подъемной силы и абсолютной величины циркуляции, а также увеличение эффективного удлинения в 2,6 раз. Здесь необходимо отметить, что при вычислении интегральных характеристик, в частности коэффициента индуктивного сопротивления, к вычислительным возможностям метода и производительности ЭВМ предъявляются высокие требования. Потому для стабилизации полученного решения проводился дополнительный пересчет аэродинамических характеристик в плоскости Трефтца, расположенной на значительном удалении от крыла вниз по потоку и ориентированной поперек набегающего потока. Пересчет возможен при условии, что вихревая пелена, заменяющая несущую систему, переносится в указанную плоскость без деформаций и изменения интегральных характеристик в результате переноса.

Оценка распределения давления показывает, что присутствие шайб в значительной степени выравнивает давление по размаху крыла, при этом области разрежения на верхней поверхности крыла и сжатия на нижней поверхности плавно переходят на внутреннюю поверхность самих шайб. Полученные в работе линейные зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки, а также за вычетом влияния скосов демонстрируют, что, благодаря влиянию шайб, удается приблизиться к характеристикам крыла с удлинением, стремящимся к бесконечности, и ввести соответствующие поправки. При увеличении размеров шайб поправки на индукцию уменьшаются, а характеристики приближаются к характеристикам профиля в безграничном потоке.

Список литературы

1. Silantiev V.A., Ryaguzov E.A. Aerodynamic Analysis of Complex Aircraft Configurations with Engine Simulation Using The Potential Panel Method // Proc. Fourth Sino-Russian Symp. Aerodynamics. Chin. Aeronautical Establishment. 1995. P. 41-56.

РАСЧЕТ ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ ГРАЖДАНСКОГО САМОЛЕТА С ПОСАДОЧНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ КРЫЛА, ПИЛОНОМ И МОТОГОНДОЛОЙ

И. С. Босняков, А. В. Воеводин, А. В. Волков

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)*

В работе рассматриваются материалы по решению задачи об обтекании самолета с посадочной конфигурацией крыла в широком диапазоне углов атаки. Задача решается численно в рамках уравнений Рейнольдса. Геометрическая модель самолета является общедоступной и предоставлена на сайте NASA High-Lift Prediction Workshop 4.

Геометрия самолета специальным образом готовится к построению расчетной сетки, в частности упрощаются излишне сложные формы. Затем вокруг устанавливается блочная структурированная сетка. Сетка строится вокруг гладких поверхностей: крыла, фюзеляжа, закрылков и предкрылков, мотогондолы. Помимо этого, сетка учитывает наличие угловатых крошечных элементов, поддерживающих выпущенную механизацию, вихрегенератор на мотогондole и другие детали, существенно усложняющие задачу. Результирующая сетка получилась очень сложной топологически, она содержит порядка 200 млн ячеек. По-видимому, этой сеткой определяется предел разумного использования возможностей специалиста по построению структурированных сеток.

Расчеты проводятся в программах комплекса EWT-ЦАГИ: zeus и zflare. Расчет выполняется на линейном участке поляры. Представлены результаты, полученные по модели турбулентности SST. Результатом расчета являются интегральные силы, действующие на модель, а также распределения давления и коэффициента трения на поверхностях. Ведется сравнение расчета с результатами эксперимента, а также с результатами других коллективов, рассчитывавших HLPW-4.

Расчеты проведены с использованием Центра коллективного пользования (ЦКП) суперкомпьютерного типа. При этом возникли существенные сложности, связанные как с использованием ЦКП, так и со сходимостью задач в присутствии отрывов в течении.

ЦКП «СКИФ»: ПРОЕКТИРУЕМЫЕ СТАНЦИИ И БУДУЩИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

А. В. Бухтияров, А. А. Сараев, Я. В. Зубавичус

*ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН, 630559,
наукоград Кольцово (Новосиб. обл.)*

ЦКП «СКИФ» — источник синхротронного излучения (СИ) поколения 4+, создаваемый в наукограде Кольцово под Новосибирском. Ускорительный комплекс ЦКП «СКИФ» состоит из линейного ускорителя электронов с энергией 200 МэВ, синхротрона-бустера на полную энергию и накопительного кольца. Накопитель релятивистских электронов с энергией 3 ГэВ, периметром 476 м и сверхмалым расчетным горизонтальным эмиттансом 73,2 пкм·рад (без учета токовых эффектов, связи бетатронных колебаний и вставных устройств) будет поставлять пучки СИ с предельной яркостью в диапазоне от 10 эВ до 100 кэВ на 30 экспериментальных станций. Для энергии фотонов ~ 1,5 кэВ эмиттанс источника приближается к волновому (дифракционному) пределу, обеспечивая высокую степень когерентности СИ и расширяя потенциал исследовательского комплекса.

Экспериментальными станциями «СКИФ» первой очереди являются: станции 1-1 «Микрофокус», 1-2 «Структурная диагностика», 1-3 «Быстропротекающие процессы», 1-4 «XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм», 1-5 «Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне» и 1-6 «Электронная структура».

Основной задачей функционирования ЦКП «СКИФ» станет инфраструктурное обеспечение фундаментальных и прикладных исследований научных и образовательных организаций, а также организаций реального сектора экономики, выступающих в роли пользователей, с целью обеспечения лидерства в приоритетных областях научно-технологического развития РФ. Инфраструктура ЦКП «СКИФ» будет использована для выполнения исследований мирового уровня в различных областях физики, химии, материаловедения, молекулярной биологии, медицины и других дисциплин с акцентом на наиболее прорывные, экономически и социально значимые мультидисциплинарные задачи.

В области фундаментальных наук приоритетными направлениями деятельности ЦКП «СКИФ» являются: развитие научных основ создания новых материалов с заданными свойствами (включая композитные и гибридные)

на основе знания их структуры; исследование механизмов функционирования живых систем, в том числе развитие бионических подходов к дизайну технических систем; развитие методологии синхротронной диагностики для эффективной реализации инновационных технологических цепочек «от идеи к коммерческому продукту»; развитие экспериментальной аппаратуры и методик обработки больших данных, в том числе для исследования ударно-волновых воздействий на вещества и материалы; структурный дизайн новых лекарственных средств для борьбы с социально значимыми заболеваниями; развитие методов медицинской диагностики и терапии; моделирование геологических и геофизических процессов в недрах Земли и планет; поиск решений глобальных экологических проблем, включая исследования материалов для альтернативной энергетики (водородной, солнечной, термоядерной).

АБСОЛЮТНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ*

В. В. Веденеев, Н. В. Никитин

Научно-исследовательский институт механики МГУ
им. М. В. Ломоносова, 119192, Москва

Обычно считается, что неустойчивость в струйных течениях несжимаемой жидкости имеет конвективный характер. Однако в последнее время было продемонстрировано несколько типов однонаправленных (без противотока) абсолютно неустойчивых профилей скорости вязких круглых струй [1–3], которые также предполагают возможность абсолютно неустойчивых плоских течений.

В работе рассматриваются двумерные плоские струи вязкой несжимаемой жидкости. Исследуется двухпараметрическое семейство гладких профилей скорости, в которых один параметр ξ управляет скоростью в точке перегиба, другой ζ — градиентом скорости (рис. 1). Характер неустойчивости исследуется с использованием критерия Бриггса [4, 5] — изучением положения седловой точки функции $\omega(\alpha)$ в комплексной плоскости. Обратная функция $\alpha(\omega)$ вычислялась численно путем решения задачи на собственные значения для уравнения Орра — Зоммерфельда. Показано, что, как и для круглых струй, неустойчивость становится абсолютной в вязком пределе ($Re \rightarrow \infty$), когда в точке перегиба либо скорость мала, либо ее градиент велик. Для течений, абсолютно неустойчивых в вязком пределе, определены

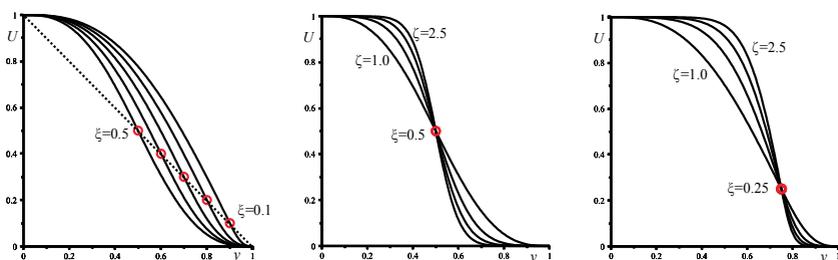


Рис. 1. Двухпараметрическое семейство профилей скорости. Параметр ξ отвечает за величину скорости в точке перегиба, параметр ζ — за градиент скорости (крутость профиля) в точке перегиба

* Работа поддержана грантом РНФ (№ 20-19-00404).

© В. В. Веденеев, Н. В. Никитин, 2023

критические значения числа Рейнольдса, соответствующие переключению между абсолютной и конвективной неустойчивостью (рис. 2).

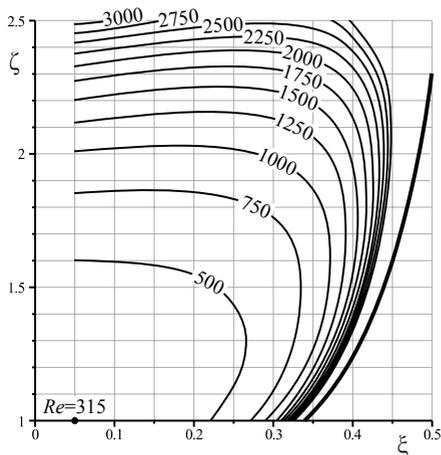


Рис. 2. Критические числа Рейнольдса перехода от абсолютной к конвективной неустойчивости на плоскости параметров ξ - ζ . Жирная линия — граница абсолютной неустойчивости в невязком пределе

Для независимой проверки анализа седловой точки проведено прямое численное моделирование роста локализованного возмущения в рамках линеаризованных уравнений Навье — Стокса. Определяется скорость роста возмущения в фиксированной точке пространства. Показано, что задний фронт возмущения движется вниз по потоку для докритического и вверх по потоку для сверхкритического Re , тем самым подтверждая результаты анализа седловой точки.

Обсуждается возможность практического создания абсолютно неустойчивых струй и их приложения.

Список литературы

1. Lesshafft L., Marquet O. Optimal velocity and density profiles for the onset of absolute instability in jets // J. Fluid Mech. 2010. Vol. 662. P. 398–408.
2. Balestra G., Gloor M., Kleiser L. Absolute and convective instabilities of heated coaxial jet flow // Phys. Fluids. 2015. Vol. 27. 054101.
3. Vedeneev V., Zayko J. On absolute instability of free jets // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 1129. 012037.
4. Briggs R. J. Electron-Stream Interaction with Plasmas. 1964. MIT Press.
5. Bers A. Space-time evolution of plasma instabilities — absolute and convective // Handbook of Plasma Physics. 1983. Chap. 3.2. P. 451–517. North-Holland.

ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ*

И. Е. Витошкин, А. А. Голышев

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Структура материалов определяется их фазовым составом и морфологией этих фаз. Понимая их связь с обработкой и химическим составом, можно управлять свойствами материалов.

Синхротронное излучение обладает чрезвычайно высокой интенсивностью (на ~ 10 порядков выше, чем классические дифрактометры с рентгеновской трубкой), что позволяет при дифракционных исследованиях получать сигнал от легких фаз, а также от фаз, имеющих малую объемную долю. Зачастую, хотя и содержание этих фаз в материале невелико, они оказывают решающее влияние на свойства материалов: цементит в сталях, β -Ti в титановых сплавах, упрочняющие фазы в алюминиевых сплавах и т. д.

В данной работе цель — показать преимущества применения синхротронного излучения в исследованиях, направленных на получение композиционных покрытий при помощи лазерных аддитивных технологий.

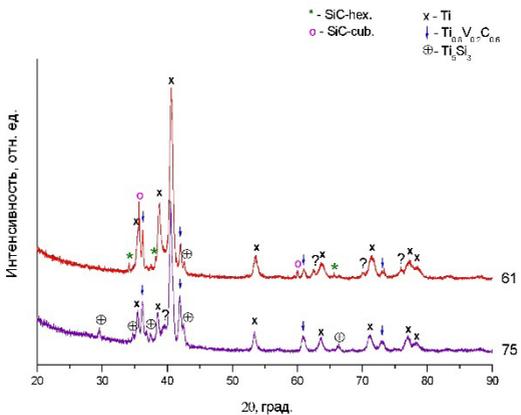
Покрытие получили из смеси порошков карбида кремния SiC и титанового сплава ВТ-6. Смесь наплавляли на титановую подложку (ВТ-6) при помощи луча Nd:YAG волоконного лазера ($\lambda = 1,07$ мкм).

В отличие от рентгеновской дифрактометрии (медная рентгеновская трубка), анализ дифракции синхротронного излучения (СИ) позволил выявить частичное упорядочивание твердого раствора α -Ti, превратившегося в α_2 Ti₃Al. Подобные превращения в материалах приводят к дополнительному упрочнению, что, наряду с образованием карбида титана, также внесло вклад в увеличение твердости матрицы: с ~ 360 до ~ 730 HV_{0,3}.

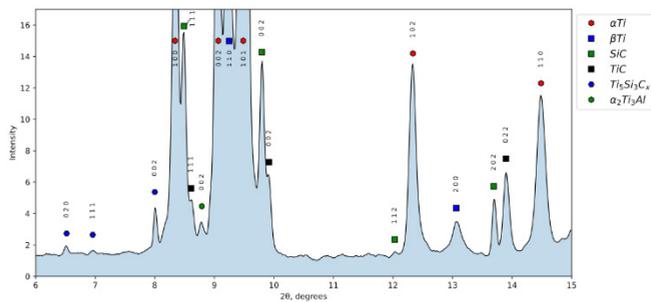
* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 21-79-10213). В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

© И. Е. Витошкин, А. А. Голышев, 2023

а



б



Сравнение результатов фазового анализа, полученных на дифрактометре (а) и при помощи дифракции СИ (б)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ТЕРМОАНЕМОМЕТРА *

О. И. Вишняков, Д. А. Бунтин

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

В настоящее время термоанемометрия остается одной из наиболее распространенных методик в задачах измерения нестационарных характеристик потока. Существует несколько типов как самих приборов, так и датчиков. Термоанемометрические датчики можно разделить на две подгруппы: зонды, у которых в качестве чувствительного элемента выступает тонкая нить/провода из тугоплавкого металла; поверхностные датчики, в основном встречаются с пленочной конструкцией из полиимида с напыленным из никеля чувствительным элементом. Термоанемометры бывают: постоянного напряжения (ТПН), постоянного тока (ТПТ) и постоянного сопротивления/температуры (ТПС). ТПС — наиболее распространенный и промышленно выпускаемый тип термоанемометра, именно данный вид термоанемометра будет рассматриваться в данной работе. Основными частями схемы ТПС являются измерительный мост с датчиком и усилитель обратной связи ОС, который, изменяя напряжение питания моста, поддерживает постоянным сопротивление датчика, включенного в одно из плеч моста. Данное напряжение — измеряемая величина, подаваемая на выход термоанемометра. Поскольку у ТПС сопротивление является постоянной и известной величиной, то, измеряя напряжение, можно рассчитать электрическую мощность, подводимую к датчику. Мощность, выделяемая на датчике, эквивалентна количеству теплоты, уносимой потоком, и пропорциональна числу Рейнольдса.

Термоанемометрический метод позволяет измерять колебания потока с частотами до сотни килогерц. Однако при получении спектров следует учитывать, что амплитудно-частотная характеристика датчика (АЧХ) и самого измерительного прибора (термоанемометра) может изменяться особенно в высокочастотном диапазоне. Скорость реакции термоанемометра на изменения потока зависит от тепловой инерции датчика и частотных ха-

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 22-21-20098) с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН) при поддержке Правительства Новосибирской области.

© О. И. Вишняков, Д. А. Бунтин, 2023

характеристик самого термоанемометра, которые, в свою очередь, определяются характеристиками операционного усилителя, а также емкостью и индуктивностью измерительной схемы.

В работе предлагается метод получения амплитудно-частотной характеристики системы «датчик — термоанемометр» путем измерения отклика датчика на импульсный нагрев лазерным излучением. Используемый в работе лазер создает импульс длительностью около 10 нс, что на несколько порядков превосходит разрешение термоанемометра и может считаться дельта-функцией, которая является сигналом с бесконечным спектром.

Исследовались характеристики ниточных датчиков с нитью диаметром 10 и 7,5 мкм, а также пленочных датчиков производства ИТПМ СО РАН и Dantec. Датчики испытывались совместно с термоанемометрами СТА-18-8 и СТА-17 (ИТПМ СО РАН) и AN-1003. Для оцифровки измеряемого сигнала использовалась АЦП L-Card 20-10 с частотой 2 МГц.

Измерения показали, что для всех пленочных датчиков график амплитудного спектра падает во всем частотном диапазоне. До 200 Гц спектры датчиков Dantec и ИТПМ практически не отличаются. С увеличением частоты амплитуда отклика датчика Dantec падает быстрее, чем у тонкопленочных датчиков, изготовленных ИТПМ. Это означает, что на высоких частотах соотношение сигнал/шум у них будет лучше.

Спектр отклика ниточного датчика показывает, что до частоты 500 Гц амплитуда спектра практически не меняется, а затем начинает падать быстрее, чем у пленочных датчиков.

Сравнение АЧХ системы «датчик — термоанемометр» с использованием разных ТПС AN-1003 и ТПС ИТПМ СТА-17 проводилось одним датчиком и с одинаковыми настройками приборов. Получено, что АЧХ данных ТПС заметно отличаются. До 1 кГц их спектры близки, в диапазоне 1–10 кГц амплитуда для ТПС AN-1003 падает медленнее, но при дальнейшем увеличении частоты спектры пересекаются, и амплитуда для ТПС AN-1003 падает быстрее, чем для ТПС ИТПМ СТА-17. Данный результат говорит о необходимости учета АЧХ именно системы «термоанемометр — датчик» для корректного восстановления пульсаций в экспериментах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИОНОСЕЛЕКТИВНЫХ МИКРОЧАСТИЦ В РАЗБАВЛЕННЫХ FENE-ЭЛЕКТРОЛИТАХ ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ ЭЛЕКТРОФОРЕЗЕ*

Г.С. Ганченко, В.С. Шелистов, Р.Р. Пономарёв,
В.А. Попов, И.И. Гребнев

Финансовый университет при Правительстве РФ (Краснодарский филиал), 350051, Краснодар

Проблема электрофореза известна достаточно давно, еще с классических работ Гельмгольца [1]. С тех пор электрофорез стал активно использоваться в медицинских и биологических приложениях, однако теоретические исследования этой проблемы только относительно недавно привели к некоторому пониманию процесса электрофореза [2, 3]. Использование микрофлюидных лабораторий на чипе лежит в основе проектирования μ TAS (*micro total analysis system*) устройств, способных проводить множество медицинских и химических анализов в микропробах. Известно [2], что применение ионоселективных материалов приводит к усилению электрокинетических эффектов, однако вместе с повышением эффективности работы использование таких материалов приводит к значительному усложнению поведения электролита, вплоть до появления стохастических режимов [4].

Особенностью использования μ TAS-устройств является необходимость учитывать не-newтоновские свойства биологических жидкостей, что значительно усложняет математическое моделирование таких устройств. Теоретические исследования в этой области на данный момент ограничены рассмотрением электрофореза в FENE-электролитах только для небольших напряженностей внешнего электрического поля и малых отклонений свойств электролита от newтоновских [5].

В данной работе будут представлены результаты обобщения задачи полного численного моделирования электрофореза ионоселективных микрочастиц [4] на случай не-newтоновских жидкостей. Электролит предполагается бинарным симметричным разбавленным раствором соли (например, раствором KCl). В качестве растворителя выступает вязкоупругая жидкость, гидродинамика которой описывается нелинейной моделью FENE [6, 7].

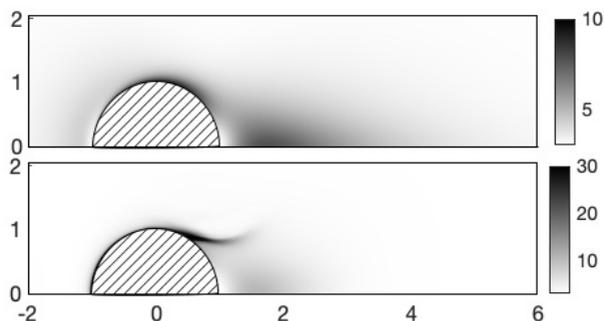
В результате моделирования показано, что добавление даже небольшого количества полимеров в раствор электролита в общем случае приводит

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-79-10085).

© Г.С. Ганченко, В.С. Шелистов, Р.Р. Пономарёв, В.А. Попов, И.И. Гребнев, 2023

к уменьшению скорости электрофореза, однако в то же время дестабилизирует течение, и электрокинетическая неустойчивость возникает при меньших значениях напряженности внешнего электрического поля.

Результаты моделирования в дальнейшем также могут быть использованы для разработки новой микрофлюидной высокоточной техники измерения реологических свойств вязкоупругих жидкостей.



Режимы обтекания микросферы в отсутствие электрического поля [7] (*сверху*) и при электрофорезе (*снизу*). Цвет на фоне соответствует следу тензора конформации (интенсивность неньютоновских свойств)

Список литературы

1. Helmholtz H. Studien über electriche Grenzschichten // Annalen der Physik und Chemie. 1879. № 7 (243). С. 337–382.
2. Dukhin S. S. Electrokinetic phenomena of the second kind and their applications // Adv. Colloid Interface Sci. 1991. № 35. С. 173–196.
3. Yariv E. Migration of ion-exchange particles driven by a uniform electric field // J. Fluid Mech. 2010. № 655. С. 105–121.
4. Ganchenko G. S. et al. Instabilities, bifurcations, and transition to chaos in electrophoresis of charge-selective microparticle // Phys. Fluids. 2020. № 5 (32). С. 054103.
5. Li G., Koch D. L. Electrophoresis in dilute polymer solutions // J. Fluid Mech. 2020. № 884. С. A9.
6. Ganchenko G., Popov V., Ponomarev R., Demekhin E. Electrokinetic Instability in Viscoelastic Fluids in Microgravity Conditions // Microgravity Sci. Tec. 2022. Т. 34, С. 85.
7. Chilcott M. D., Rallison J. M. Creeping flow of dilute polymer solutions past cylinders and spheres // J. Non-Newtonian Fluid Mech. 1988. № 29. С. 381–432.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГЕБРАИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА РОСТА ВОЗМУЩЕНИЙ В ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ*

Л. Р. Гареев, Д. А. Ашуров, В. В. Веденеев, О. О. Иванов

Научно-исследовательский институт механики
МГУ им. М. В. Ломоносова, 119192, Москва

Известно, что в пристенных течениях, наряду с ростом модальной неустойчивости, имеет место немодальный *lift-up* механизм линейного роста возмущений. Этот механизм вызывает сильное нарастание трехмерных возмущений и приводит к *bypass* сценарию перехода к турбулентности [1]. Кинетическая энергия возмущений при этом увеличивается гораздо быстрее вниз по потоку по сравнению с энергией собственных мод. В неограниченных течениях, таких как затопленные струи, теоретические исследования немодального механизма проводились только в последнее десятилетие [2, 3]. Этот механизм еще не был экспериментально обнаружен в струях, и его роль в переходе к турбулентности в таких течениях остается неясной.

Данная работа посвящена экспериментальной части исследования развития стационарных возмущений в осесимметричной ламинарной затопленной струе ($D = 0,12$ м, $Re = 5400$). Струйное течение формируется устройством специального вида, благодаря особой конструкции которого исследуемая затопленная струя остается ламинарной на очень длинном участке ($5D$ и более), что позволяет отслеживать развитие возмущений глубоко вниз по потоку [4]. Описываемое течение имеет профиль скорости, отличный от «классических», — три точки перегиба, которые генерируют два семейства растущих возмущений. Исследование модального механизма роста возмущений в таком течении было проведено ранее: показано хорошее соответствие результатов линейной теории экспериментальным данным [5].

Для исследования немодального механизма разработаны специальные тонкие волнистые конструкции (дефлекторы), которые были помещены в поток на малом расстоянии от сопла для внесения стационарных возмущений с разными азимутальными волновыми числами n (пример такого дефлектора приведен на рисунке).

Проведены серии визуализации струи лазерным ножом, термоанемометрических экспериментов и PIV-измерений. Проанализированы и обрабо-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (№ 20-19-00404).

© Л. Р. Гареев, Д. А. Ашуров, В. В. Веденеев, О. О. Иванов, 2023

таны полученные экспериментальные данные. Результаты подтверждают, что благодаря внесению стационарных возмущений немодальный механизм роста возбужден и характерные продольные вихревые структуры обнаружены, а параметры их развития вниз по потоку соответствуют имеющимся теоретическим представлениям.

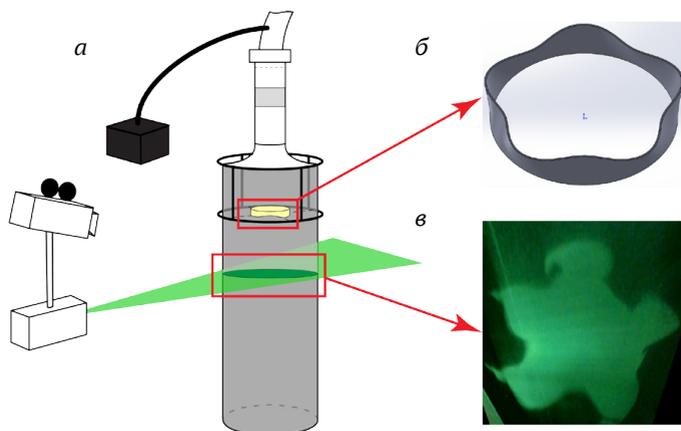


Схема экспериментальной установки для визуализации течения с установленным в него дефлектором (а), модель дефлектора с $n = 5$ (б), визуализация поперечного сечения струи под действием стационарного возмущения, создаваемым дефлектором, на расстоянии $2D$ вниз по потоку (в)

Список литературы

1. Matsubara M., Alfredsson P.H. Disturbance growth in boundary layers subjected to free-stream turbulence // J. Fluid Mech. 2001. Vol. 430. P. 149–168.
2. Boronin S.A., Healey J. J., Sazhin S. S. Non-modal stability of round viscous jets // J. Fluid Mech. 2013. Vol. 716. P. 96–119.
3. Jimenez-Gonzalez J.I., Brancher P., Martinez-Bazan C. Modal and non-modal evolution of perturbations for parallel round jets // Phys. Fluids. 2015. Vol. 27, № 4. 044105.
4. Зайко Ю. С., Решмин А. И., Тепловодский С. Х., Чичерина А. Д. Исследование затопленных струй с увеличенной длиной начального ламинарного участка // Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 1. С. 97–106.
5. Gareev L. R., Zayko J. S., Chicherina A. D., Trifonov V. V., Reshmin A. I., Vedenev V. V. Experimental validation of inviscid linear stability theory applied to an axisymmetric jet // J. Fluid Mech. 2022. Vol. 934. A3.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ*

И. С. Герцель, М. А. Гулов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Аддитивные технологии широко используются во многих отраслях машиностроения. Один из методов аддитивного производства — DMD (*Direct Metal Deposition*), в котором подача металлического порошка осуществляется через коаксиальное сопло с последующим сплавлением с помощью лазерного излучения [1–3]. Проблематикой наплавки металлокерамических порошков является подверженность гетерогенных материалов к образованию внутренних дефектов, таких как поры и трещины [1, 4, 5].

В работах по лазерной наплавке с использованием модуля предварительного нагрева подложки, на которую производится наплавка, утверждается, что нагрев способствует снижению внутренних остаточных напряжений, вызывающих образование трещин в покрытиях [4, 5]. В работе [6] произведена наплавка без применения предварительного нагрева, найдены режимы наплавки, обеспечивающие отсутствие трещин при содержании керамики 10 % масс. Однако в работе [7] по исследованию наплавки порошков NiCrSiB 40 % масс. и 60 % масс. WC использование предварительного нагрева предотвращает формирование трещин в покрытии.

В настоящей работе исследовано влияние предварительного нагрева на структуру покрытий, полученных методом прямого лазерного выращивания порошков ВТ-6 с различным содержанием частиц керамики B_4C (рис. 1, 2).

На основании теоретических материалов взаимодействия лазерного излучения с веществом [8, 9] получена модель, описывающая фазовые превращения в материале по скоростям охлаждения и градиентам температур в области термического воздействия.

* Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 121030900259-0) и с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

© И. С. Герцель, М. А. Гулов, 2023

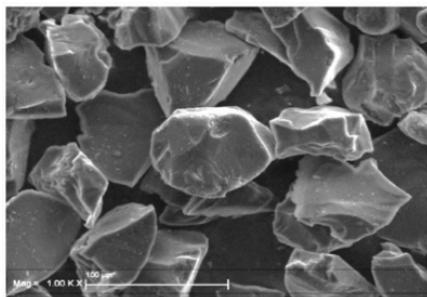


Рис. 1. Керамические частицы В₄С

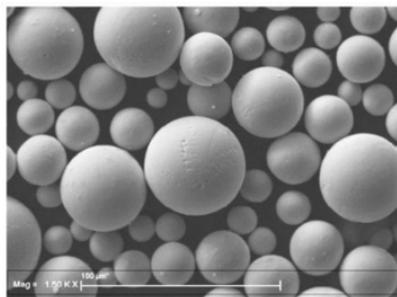


Рис. 2. Порошок ВТ-6

В ходе эксперимента получены покрытия при температурах предварительного нагрева подложки 150; 300; 500 °С. Измерена микротвердость в поперечном сечении покрытий по методу Виккерса на микротвердомере Wilson Hardness Group Tukon 1102 с нагрузкой 300 г.

Получены данные износостойкости при помощи трибометра Nanovea N50.

Структурно-фазовый анализ полученных образцов проводился при помощи растрового электронного микроскопа Zeiss EVO MA 15 в ИТПМ СО РАН.

Список литературы

1. Фомин В. М., Гольшев А. А., Косарев В. Ф., Маликов А. Г., Оришич А. М., Филиппов А. А. Создание металлокерамических структур на основе Ti, Ni, WC и В₄С с применением технологии лазерной наплавки и холодного газодинамического напыления // Физ. мезомеханика. 2019. Т. 22, № 4. С. 5–15.
2. Li N. et al. Progress in additive manufacturing on new materials: A review // J. Mater. Sci. Technol. 2019. Vol. 35, № 2. P. 242–269.
3. Lee H. et al. Lasers in additive manufacturing: A review // Int. J. Precision Eng. Manuf. — Green Technol. Korean Soc. Precision Eng. 2017. Vol. 4, № 3. P. 307–322.
4. Mirkoohi E. et al. Residual stress modeling considering microstructure evolution in metal additive manufacturing // J. Manuf. Process. Elsevier Ltd. 2021. Vol. 68. P. 383–397.
5. Ding C. et al. Effects of substrate preheating temperatures on the microstructure, properties, and residual stress of 12CrNi2 prepared by laser cladding deposition technique // Materials. 2018. Vol. 11, № 12.
6. Golyshv A., Orishich A. Microstructure and mechanical characterization of Ti6Al4V-B 4 C metal ceramic alloy, produced by laser powder-bed fusion additive manufacturing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2020. Vol. 109, № 1–2. P. 579–588.
7. Sadhu A. et al. A study on the influence of substrate pre-heating on mitigation of cracks in direct metal laser deposition of NiCrSiBC-60%WC ceramic coating on Inconel 718 // Surf. Coat. Technol. Elsevier B. V. 2020. Vol. 389.
8. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1959.
9. Kurz W., Fisher D. F. Fundamentals of solidification. 1984. P. 242.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК САМОЛЕТА КОРОТКОГО ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ НА БОЛЬШИХ УГЛАХ АТАКИ МЕТОДОМ ИСПЫТАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИ ПОДОБНОЙ СВОБОДНОЛЕТАЮЩЕЙ МОДЕЛИ И ДИНАМИЧЕСКИ ПОДОБНОЙ МОДЕЛИ НА ШАРНИРНОМ ПОДВЕСЕ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

**А. М. Гильманов, В. Д. Скворцова, В. Ю. Зайцев,
В. А. Мымрин, М. Г. Никитин, В. И. Петошин**

*Сибирский научно-исследовательский институт авиации
им. С. А. Чаплыгина, 630051, Новосибирск*

Для выполнения взлета и посадки на ограниченную площадку необходимо сократить длину и разбега/пробега, и воздушного участка. Это достигается увеличением угла наклона траектории, что на взлете требует повышения тяговооруженности и аэродинамического качества, а на посадке — снижения аэродинамического качества. Увеличение сопротивления (без применения массивных средств торможения) обеспечивается выходом самолета на большие углы атаки, вплоть до режима «парашютирования». Движение самолета на закритических углах атаки сопряжено со сложностью обеспечения устойчивости и управляемости. Моделирование движения самолета на больших углах атаки, в том числе с моделированием работы силовых установок (СУ), в аэродинамической трубе (АДТ) сложно реализуемо, отсюда возникла необходимость проведения исследования свободнолетающей модели.

В работе изучены характеристики самолета короткого взлета и посадки (КВП) методом испытания свободнолетающей динамически подобной летающей модели (ДПЛМ) [1, 2].

Целью ДПЛМ является исследование характеристик самолета КВП на больших углах атаки и отработка рациональной траектории на взлете и посадке.

Результаты испытаний ДПЛМ в свободном полете:

- скорость отрыва (взлет) ДПЛМ соответствует расчетной;
- модель показала хорошую управляемость в горизонтальном полете на малых углах атаки;

© А. М. Гильманов, В. Д. Скворцова, В. Ю. Зайцев, В. А. Мымрин, М. Г. Никитин, В. И. Петошин, 2023

– при переходе к большим углам атаки подтверждены особенности поведения исследуемой компоновки самолета КВП — локальная неустойчивость и общая сложность пилотирования;

– установлены предварительные летные и эксплуатационные ограничения для следующих этапов испытаний.

В связи со сложностью пилотирования ДПМ и большими рисками поломки модели принято решение провести испытание модели в АДТ на трехступенном шарнире с целью определения характера неустойчивости и поиска решений по модификации компоновки ДПМ.

В ходе испытаний ДПМ в АДТ:

– определен характер срыва в зависимости от работы маршевой силовой установки;

– рассмотрено влияние режима работы МСУ на управляемость по тангажу и максимальный балансировочный угол;

– спектры обтекания (визуализация методом шелковинок) показали зоны развития отрыва течения от несущих поверхностей;

– полученный характер поведения модели на трехступенном шарнире согласуется с экспериментальными данными весовых испытаний модели самолета КВП в АДТ (весовые испытания проводились до углов атаки 30...35°);

– опробованы доработки планера: корневые наплывы несущих поверхностей, концевые шайбы, винглеты, выдув струи вдоль несущей поверхности, дефлекторы и интерцепторы.

В результате работы предложена комбинация доработок планера ДПМ, способствующая значительному улучшению управляемости и устойчивости модели, а также позволившая провести тренировку пилота ДПМ, в ходе которой был выполнен управляемый выход модели в АДТ на угол атаки 60...65°.

Список литературы

1. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. Изд. 8-е, перераб. М.: Наука, 1977. 440 с.

2. Миронов А. Д., Владычин Г. П., Кондратов А. А. и др. Методы исследования на летающих моделях / под ред. А. Д. Миронова. М.: Машиностроение, 1988. 144 с.

ВЛИЯНИЕ ТИПА КЕРАМИКИ НА СВОЙСТВА ТИТАНО-МАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА, СОЗДАВАЕМОГО МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ*

А. А. Гольшев

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск

Введение. В настоящее время лазерные технологии успешно внедряются в современное производство и особенно активно используются в высокотехнологических отраслях промышленности, таких как авиастроение, ракетостроение, судостроение, автомобилестроение и др. [1–3].

Одним из перспективных направлений развития аддитивных технологий является создание функционально-градиентных материалов (ФГМ) [4], особенно титано-матричных композитов [5]. В данных материалах удается достигнуть высокого сопротивления ударному разрушению благодаря вкладу внутренних и внешних механизмов. Внутренние механизмы связаны с микроструктурой материала (размер зерна, состояние границ зерен, расположение частиц и образование вторичных фаз и т. д.), все остальные факторы, приводящие к повышению ударной вязкости, относят к внешним механизмам.

Результаты. Установлены фундаментальные закономерности создания ФГМ, полученных с помощью аддитивного выращивания. Впервые показано влияние керамики TiB, TiB₂, B₄C, WC, SiC, металлического В при разном массовом содержании их в исходной смеси на механику структурно-фазового состава и механические характеристики ФГМ на основе титанового сплава. Впервые продемонстрировано, что, управляя концентрацией керамики в исходной смеси, можно влиять на формирование заданных механических свойств за счет изменения структурно-фазового состава с помощью формирования различного типа вторичных фаз в результате *in situ* синтеза.

Список литературы

1. Thijs L. Microstructure and texture of metal parts produced by selective laser melting: Dissertation. KU Leuven, Belgium, 2014.
2. Гольшев А. А. Стандартизация лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 1 (70). С. 16–21.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (№ 21-79-10213).

© А. А. Гольшев, 2023

3. Киселева Т. А., Гольшев А. А., Яковлев В. И., Оришич А. М. Влияние теплового следа от оптического пульсирующего разряда на силу аэродинамического сопротивления // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 2 (110). С. 269–276.

4. Фомин В. М., Гольшев А. А., Маликов А. Г и др. Создание функционально-градиентного материала методом аддитивного лазерного сплавления // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61, № 5. С. 224–234.

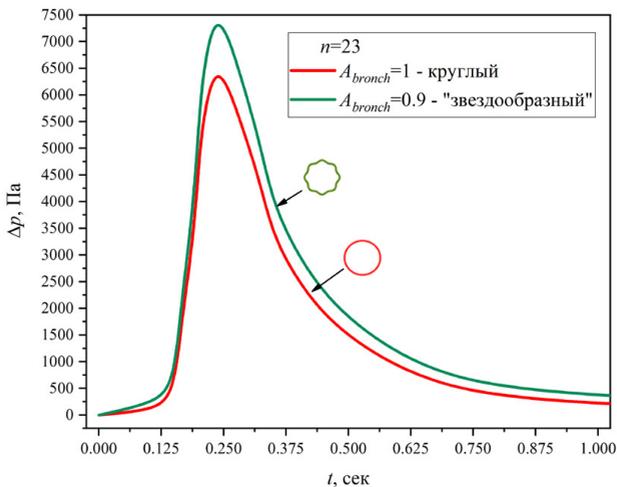
5. Гольшев А. А., Оришич А. М. Влияние параметров лазерного воздействия на формирование ванны расплава металлокерамической смеси В4С — Тl-6AL-4V // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63, № 2. С. 104–116.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В ПОЛНОМ БРОНХИАЛЬНОМ ДЕРЕВЕ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ОБСТРУКТИВНЫХ И ХРОНИЧЕСКИХ БОЛЕЗНЯХ ЛЕГКИХ*

П. С. Голышева, А. Е. Медведев

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск

Респираторная система человека составляет совокупность органов, обеспечивающих дыхание, а именно легкие и дыхательные пути. Строение дыхательных путей представляет трахею с разветвленными бронхами. Бронхи человека имеют сложную древовидную структуру, состоящую из миллионов бронхов, которые заканчиваются альвеолами (более 8 млн). Характерные размеры бронхов уменьшаются в 240 раз по мере «роста» бронхиального дерева. Поэтому построение полного бронхиального дерева человека — очень сложная и трудоемкая задача, которая является невыполненной до настоящего времени.



Результаты численных расчетов полного бронхиального дерева при нестационарном входе для здоровой дыхательной системы и при БА (сужение бронхов — 10 %)

© П. С. Голышева, А. Е. Медведев, 2023

Цель данной работы — продемонстрировать на разработанном ранее авторами алгоритме построение нижних дыхательных путей [1] и методики поэтапного расчета в полном (от трахеи до альвеол) бронхиальном дереве легких человека при имитации дыхания человека, страдающего бронхиальной астмой (БА) или обструктивными заболеваниями.

В рамках данной работы проведены расчеты нестационарного вдоха. В качестве основных параметров выбрана стандартная спирометрия [2].

Расчеты осуществлялись для «звездообразного» сечения бронха. На рисунке показаны результаты расчета перепада давления при нестационарном вдохе на выходе из 23-й бифуркации при здоровой дыхательной системе и при сужении бронха на 10 % (по сравнению с круглым сечением), вызванном начальной стадией заболевания БА.

Показано, что при нестационарном вдохе перепад давления на выходе из 23-й бифуркации при «звездообразном» сужении бронхов на 10 % возрастает по сравнению со здоровым бронхиальным деревом, но при этом сохраняется спирометрическая форма кривой давления. Видно, что сужение бронхов даже на 10 % затрудняет дыхание на 15 %.

Список литературы

1. Medvedev A. E., Gafurova P. S. Analytical design of the human bronchial tree for healthy patients and patients with obstructive pulmonary diseases // *Math. Biol. Bioinformatics*. 2019. Vol. 14 (2). P. 635–648.
2. Miller M. R., Hankinson J., Brusasco V. et al. Standardisation of spirometry // *Eur. Respir. J.* 2005. Vol. 26. P. 319–338.

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ УСТАЛОСТИ*

А. В. Гончар, А. А. Соловьев

*Институт проблем машиностроения РАН — филиал
Института прикладной физики РАН, 603024, Нижний Новгород*

Проведено исследование усталостного разрушения участков зоны термического влияния (ЗТВ) сварного соединения из стали Ст3сп5 ультразвуковым эхо-импульсным и металлографическим методом. Плоскопараллельные образцы подвергались консольному симметричному изгибу с частотой 8 Гц в мягком регулярном режиме с амплитудами напряжения цикла 250 и 270 МПа.

При усталости наблюдается увеличение концентрации полос скольжения в зернах и образование большого количества темных участков в микроструктуре, что связано со стесненным поворотом и фрагментацией зерен в процессе разрушения материала, которые приводят к изменению условий отражения света от поверхности. Эволюция микроструктуры участка перегрева при усталости приведена на рис. 1.

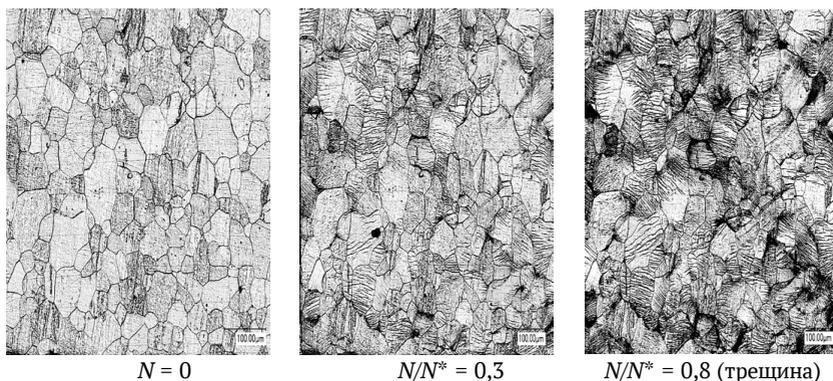


Рис. 1. Эволюция микроструктуры участка перегрева стали Ст3сп5

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 21-79-10395), <https://rscf.ru/project/21-79-10395/>.

© А. В. Гончар, А. А. Соловьев, 2023

Проведен количественный анализ эволюции микроструктуры и рассчитано приращение фрактальной размерности ΔDF при циклическом деформировании для участков перегрева и нормализации (рис. 2).



Рис. 2. Зависимость приращения фрактальной размерности от относительного числа циклов для участков перегрева (1) и нормализации (2) ($\sigma_{\max} = 250$ МПа (А) и $\sigma_{\max} = 270$ МПа (Б))

Для оценки структурной деградации использовали акустический параметр D_c :

$$D_c = \frac{C_t^{\parallel} + C_t^{\perp}}{C_l},$$

где C_t^{\parallel} , м/с — скорость сдвиговой волны с поляризацией вдоль образца; C_t^{\perp} , м/с — скорость сдвиговой волны с поляризацией поперек образца; C_l , м/с — скорость продольной волны.

В процессе циклического деформирования наблюдается монотонное уменьшение D_c , что связано с накоплением доли структурных дефектов (рис. 3).

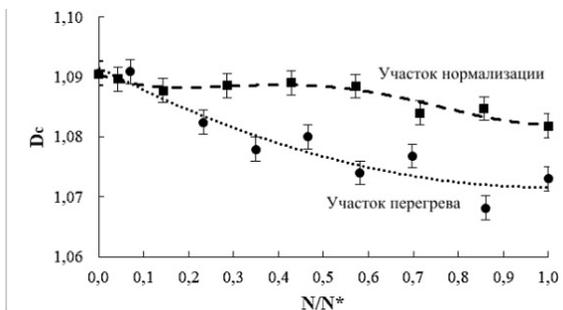


Рис. 3. Зависимость акустического параметра D_c от относительного количества циклов

Приведенные зависимости позволяют провести оценку накопленной структурной поврежденности и ресурса материала на различных участках ЗТВ.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ МЕТОДОМ АСИМПТОТИЧЕСКОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ

Г.Л. Горынин, А.В. Иванов

Сургутский государственный университет, 628403, Сургут

Используется метод асимптотического расщепления для математического моделирования напряженного состояния криволинейного стержня. Данный метод описан в работах [1, 2].

С помощью данного метода показано [3], что перемещения сечения криволинейного стержня подчиняются дифференциальным уравнениям

$$\begin{aligned} B_r^{v_r,0} v_r + B_r^{v_r,2} \frac{d^2 v_r}{d\psi^2} \varepsilon^2 + B_r^{v_r,4} \frac{d^4 v_r}{d\psi^4} \varepsilon^4 + B_r^{v_\psi,1} \frac{dv_\psi}{d\psi} \varepsilon &= p_r, \\ B_\psi^{v_r,1} \frac{dv_r}{d\psi} \varepsilon + B_\psi^{v_r,3} \frac{d^3 v_r}{d\psi^3} \varepsilon^3 + B_\psi^{v_\psi,2} \frac{d^2 v_\psi}{d\psi^2} \varepsilon^2 &= p_\psi, \end{aligned} \quad (1)$$

где $B_\alpha^{v_\beta,k}$ — некоторые константы, которые вычисляются для конкретного сечения стержня; v_γ — перемещения сечения в направлении γ ; ε — малый параметр, равный отношению высоты стержня к его длине.

В теории показано, что все коэффициенты $B_\alpha^{v_\beta,k}$, кроме $B_\psi^{v_r,1}$ и $B_r^{v_r,4}$, пропорциональны малому параметру ε_1 , который равен отношению высоты стержня к радиусу кривизны. Тогда при $\varepsilon_1 \rightarrow 0$ получают уравнения, описывающие изгиб и растяжение-сжатие прямолинейного стержня. Таким образом, уравнения (1) являются обобщением уравнений, которые получены в классической теории строительной механики для прямолинейного стержня.

Частным случаем криволинейного стержня является кольцо. С помощью системы (1) получены уравнения, которые описывают напряженно-деформированное состояние тонкостенного слоистого кольца под сжимающей нагрузкой:

$$\begin{aligned} v_r &= p_0 R^2 / \left(\sum_1^s E_j h_j \right), v_\psi = 0, (\sigma_{\psi\psi})_i = p_0 R E_i / \left(\sum_1^s E_j h_j \right), \\ (\sigma_{rr})_i &= p_0 \left(\sum_i^s E_j h_j - E_i \left(r - R - \sum_1^{i-1} h_j \right) \right) / \left(\sum_1^s E_j h_j \right), (\sigma_{r\psi})_i = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где i — номер слоя, всего s слоев; E_i — модуль Юнга на i -м слое; h_i — высота i -го слоя.

Формулы (2) являются обобщением формул, которые получаются для однослойного кольца под сжимающей нагрузкой в теории строительной механики.

Таким образом, метод асимптотического расщепления позволяет получать аналитические формулы при решении задач теории упругости, в том числе все формулы для компонент тензора деформаций и тензора напряжений.

Список литературы

1. Горынин Г. Л., Немировский Ю. Н. Деформирование слоистых анизотропных стержней в пространственной постановке // Механика композитных материалов. 2009. Т. 45, № 3.
2. Горынин Г. Л., Немировский Ю. Н. Деформирование слоистых анизотропных стержней в пространственной постановке. 2: Продольно-поперечный изгиб и условие кромочной совместимости // Механика композитных материалов. 2010. Т. 46, № 1.
3. Горынин Г. Л., Иванов А. В. Деформирование слоистых криволинейных стержней с вертикальной осью симметрии в пространственной постановке. Сообщение 1: Общая теория // Изв. вузов. Строительство. 2021. № 4.

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПОРОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ ГОРНОЙ ПОРОДЫ*

А. С. Губкин, Н. А. Иванова

Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень

При описании течения флюидов в пористой среде широкое распространение получили методы вычислительной гидродинамики, которые сводятся к интегрированию уравнений Навье — Стокса в поровом пространстве [1, 2]. Также понимание процессов течения в пористых структурах важно для теоретических исследований [3–5].

Данная работа посвящена прямому моделированию течения линейно-вязкой несжимаемой жидкости в поровом пространстве горной породы.

Реконструкция порового пространства (рис. 1) производилась на основе послойных снимков томограммы горной породы, представленных в тонах серого. Из послойных снимков строилась воксельная модель, затем изоповерхность по заданному уровню яркости вокселя. Для порового пространства была создана контрольно-объемная сетка (рис. 2).

Расчет однофазного течения проводился в открытом программном комплексе OpenFOAM с помощью решателя simpleFoam.

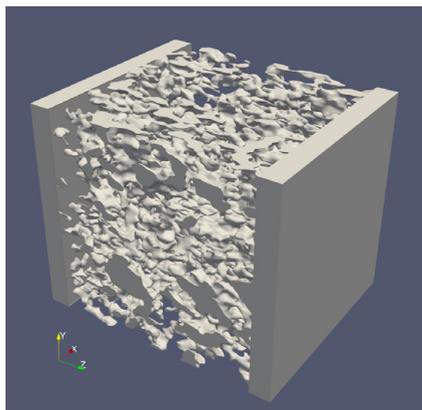


Рис. 1. Поверхность порового пространства

* Авторы выражают благодарность ассистенту кафедры ГНГ Тюменского индустриального университета, А. А. Пономареву, за предоставленные томограммы горной породы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы НЦМУ «Передовые цифровые технологии» (контракт № 075-15-2020-935) и программы развития университета «Приоритет-2030» в Центре природовдохновленного инжиниринга.

© А. С. Губкин, Н. А. Иванова, 2023

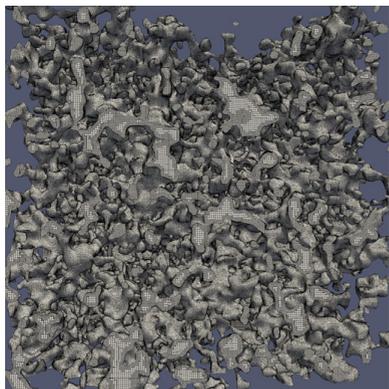


Рис. 2. Характерный вид конечно-объемной сетки

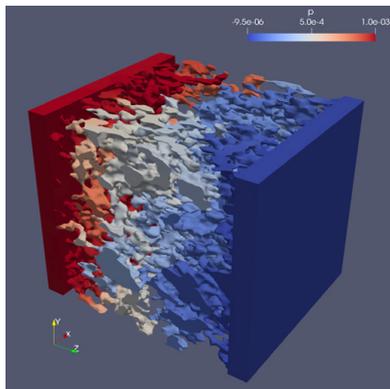


Рис. 3. Поле давления на поверхности скелета горной породы

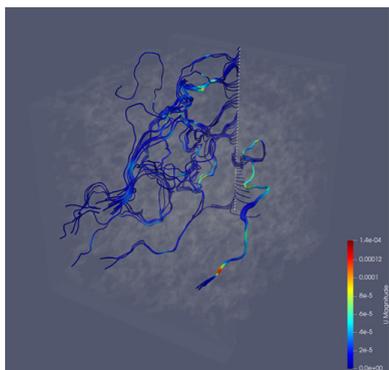


Рис. 4. Линии тока

Получены поля давления (рис. 3) и скорости. Рассчитано распределение извилистостей для пучка линий тока (рис. 4). Определен тензор проницаемости и его характеристики для исследуемой области горной породы.

Список литературы

1. Арсеньев-Образцов С. С. Определение тензора коэффициентов проницаемости численным моделированием течения флюида на цифровой модели пористой среды // Тр. Рос. гос. ун-та нефти и газа им. И. М. Губкина. 2015. № 4 (281). С. 64–77.
2. Губкин А. С., Игошин Д. Е., Трапезников Д. В. Численный расчет проницаемости в двумерной пористой среде со скелетом из случайно расположенных пересекающихся дисков // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2, № 4. С. 54–68.
3. Whitaker S. Flow in porous media I: A theoretical derivation of Darcy's law // Transp. Porous. Med. 1986. Vol. 1. P. 3–25.
4. Whitaker S. Flow in porous media II: The governing equations for immiscible, two-phase flow // Transp. Porous. Med. 1986. Vol. 1. P. 105–125.
5. Du Plessis J. P., Masliyah J. H. Mathematical modelling of flow through consolidated isotropic porous media // Transp. Porous. Med. 1988. Vol. 3. P. 145–161.

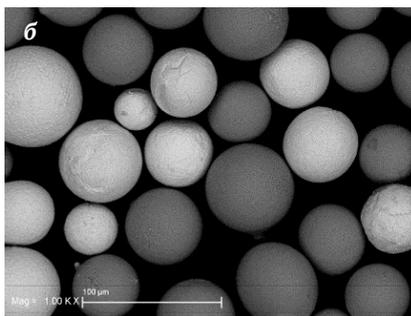
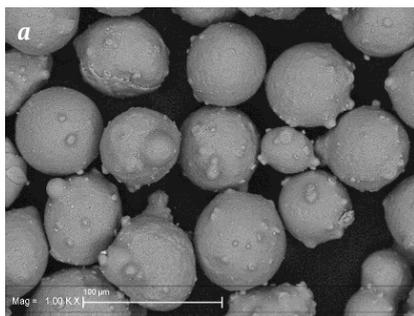
ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ*

М. А. Гулов, И. С. Герцель, А. А. Филиппов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

В настоящее время технологии аддитивного производства привлекают все больше внимания ввиду их уникальных возможностей по послойному изготовлению функциональных изделий из металлов, сплавов и металлических композитов. Использование лазерного излучения в качестве источника тепла в сочетании с другими технологическими особенностями этих технологий делает возможным производство деталей сложной формы, изготовление которых было бы невозможно при применении традиционных методов [1–4].

В работе была произведена оптимизация наплавки двух различных порошков на никелевой основе и создано градиентное износостойкое металл-керамическое покрытие без внутренних дефектов [5]. Для наплавки первого слоя использовался порошок Oerlikon MetcoClad 625. Для наплавки верхнего слоя — порошок Oerlikon MetcoClad 52052, представляющий собой



Изображения используемых для наплавки порошков, полученные с помощью электронного микроскопа: *а* — Oerlikon MetcoClad 625; *б* — Oerlikon MetcoClad 52052

* Работа выполнена в рамках государственного задания № 121030900259-0 и с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

© М. А. Гулов, И. С. Герцель, А. А. Филиппов, 2023

смесь 6 : 4 масс — сферических частиц карбида вольфрама и металлической матрицы NiCrSiB. Лазерная наплавка смеси сферических частиц карбида вольфрама и коррозионно-стойкой матрицы позволяет получить материал, обладающий высокой износостойкостью в условиях работы в средах с повышенными кислотностью и температурой.

В работе был проведен структурно-фазовый анализ полученных образцов и измерены их механические свойства. Было исследовано влияние предварительного нагрева подложки до 500 °С на трещино- и порообразование. Микроструктурные исследования проводились при помощи растрового электронного микроскопа Zeiss EVO MA 15 в ИТПМ СО РАН.

Лазерная наплавка производилась при помощи иттербиевого волоконного лазера мощностью до 3 кВт и длиной волны излучения 1,07 мкм.

Оптическое исследование структуры полученных образцов проводилось на оптическом конфокальном микроскопе Olympus LEXT 3000.

Измерения микротвердости проводились по методу Виккерса на микротвердомере Wilson Hardness Group Tukon1102 с нагрузкой 300 г.

Износостойкость полученных образцов были исследованы при помощи трибометра Nanovea N50.

Список литературы

1. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms // *Int. Mater. Rev.* 2012. Vol. 57. P. 133–164.

2. Фомин В.М., Гольшев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Филиппов А.А. Создание функционально-градиентного материала методом аддитивного лазерного сплавления // *Прикладная механика и техническая физика.* 2020. Т. 61, № 5 (363). С. 224–234.

3. Гольшев А.А., Оришич А.М., Филиппов А.А. Законы подобия лазерной наплавки металлокерамических покрытий // *Прикладная механика и техническая физика.* 2019. Т. 60, № 4 (356). С. 194–205.

4. Фомин В.М., Гольшев А.А., Косарев В.Ф., Маликов А.Г., Оришич А.М., Филиппов А.А. Создание металлокерамических структур на основе Ti, Ni, WC и B₄C с применением технологии лазерной наплавки и холодного газодинамического напыления // *Физ. мезомеханика.* 2019. Т. 22, № 4. С. 5–15.

5. Gulov M.A. Optimization of laser cladding parameters of nickel-based metal powder for creation a heat-resistant coating // *J. Phys.: Conf. Series: Int. Conf. Beam Technologies Laser Applications, BTLA/2021 (St. Petersburg, 20–22 Sept. 2021).* S.l.: IOP Publishing, 2021. Vol. 2077, Pt. 1. P. art. 012006.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ПЛАСТИКА НА ПРОЦЕССЫ ЕГО УТИЛИЗАЦИИ

Д. Ю. Давыдович

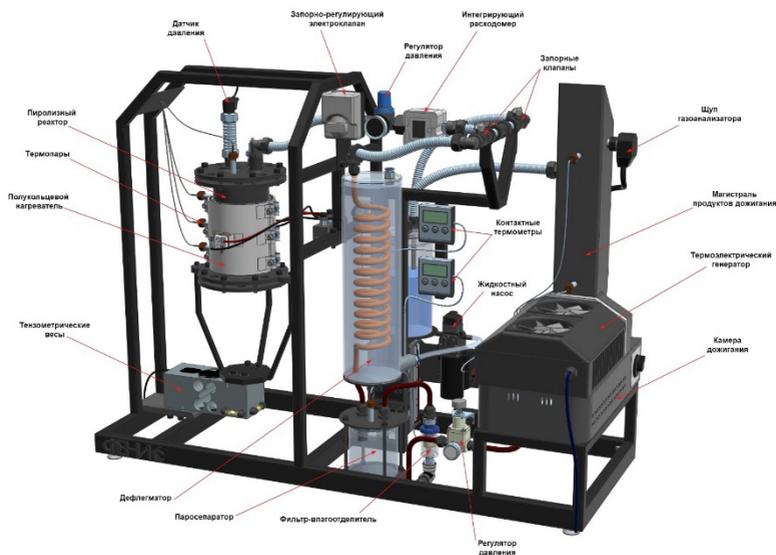
Омский государственный технический университет, 644050, Омск

Рассматривается процесс утилизации нефтепродуктовой тары из пластика на основе ее измельчения и последующего пиролиза с дожиганием пиролизного газа в дожигательной установке. Использование полученной теплоты осуществляется в двух направлениях: на обеспечение процесса пиролиза и получение электрической энергии на основе применения, например, термоэлектрических способов.

Известен ряд исследований по утилизации пластика на основе пиролиза и последующего дожигания пиролизного газа для получения теплоты, например, для систем теплоснабжения [1, 2], электроэнергии [3, 4]. Специфика предлагаемого исследования заключается в создании экспериментальной лабораторной установки (ЭЛУ) на основе теории подобия как целью выбора параметров производственной утилизационной установки на основе процесса пиролиза с рекуперацией теплоты в электрическую энергию, заданной производительностью по утилизации и эффективной мощности электрической энергии. Дополнительным ограничением является состав и содержание токсичных веществ в дымовых газах дожигательной установки. В качестве критерия потерь тепловой энергии принимается температура дымовых газов на выходе из дожигательной камеры.

Математическое описание создаваемой ЭЛУ, помимо использования теории подобия, осуществляется численными методами с помощью специальных пакетов численного моделирования Ansys, включающих в себя: определение теплофизических характеристик измельченного полимерного материала в зависимости от степени измельчения и температуры нагрева; сравнение полученных результатов с результатами других исследований; использование полученных характеристик для моделирования сложного теплообмена в пиролизной и дожигательной камерах ЭЛУ (см. рисунок); термомеханическое моделирование больших температурных градиентов в термоэлектрических элементах с целью оценки возникающих напряжений и их влияния на целостность и производительность установки по преобразованию тепловой энергии в электрическую; создание на основе численного

моделирования методики предварительной оценки проектных параметров ЭЛУ [5–7].



Экспериментальная лабораторная установка пиролизной утилизации полимерных материалов

Список литературы

1. Raveh-Amit H. et al. Catalytic pyrolysis of high-density polyethylene: decomposition efficiency and kinetics // *Catalysts*. 2022. Vol. 12, № 2. P. 140.
2. Liu X. et al. Towards enhanced understanding of synergistic effects in co-pyrolysis of pinewood and polycarbonate // *Appl. Energy*. 2021. Vol. 289. P. 116662.
3. Bacskai I. et al. Modeling of Some Operating Parameters Required for the Development of fixed bed small scale pyrolysis plant // *Resources*. 2019. Vol. 8, № 2. P. 79.
4. Salvador J. R. et al. Thermal to electrical energy conversion of skutterudite-based thermoelectric modules // *J. Electron. Mater.* 2013. Vol. 42, № 7. P. 1389–1399.
5. Rudniak L., Machniewski P.M. Modelling and experimental investigation of waste tire pyrolysis process in a laboratory reactor // *Chem. Process Eng.* 2017. Vol. 38, № 3. P. 445–454.
6. Simsek E. et al. Numerical simulation of grate firing systems using a coupled CFD/ discrete element method (DEM) // *Powder Technol.* 2009. T. 193, № 3. P. 266–273.
7. Soto M.A., Subramanian R. ANSYS-based detailed thermo-mechanical modeling of complex thermoelectric power designs // *ICT 2005. 24th Int. Conf. Thermoelectric*. 2005. IEEE, 2005. P. 219–221.

РАСЧЕТЫ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ДЛЯ ТЕЧЕНИЙ НА ВЫТЯНУТОМ СФЕРОИДЕ И СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ*

Н. В. Демиденко, А. В. Бойко

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Турбулизация течения существенно влияет на аэро- и гидродинамические характеристики обтекаемых объектов, поэтому прогноз положения ламинарно-турбулентного перехода является важной задачей аэро- и гидродинамики.

В линеаризованные уравнения Навье – Стокса, используемые при решении задач гидродинамической устойчивости и перехода к турбулентности, в качестве важных параметров входят профили продольной и поперечной компонент скорости основного течения и их производные по нормали к стенке, поэтому требование к точности таких профилей высокое. Желаемую точность трудно обеспечить при численном решении задач обтекания потоком сложных (например, трехмерных) конфигураций в газодинамическом пакете ANSYS Fluent, в котором используются численные схемы низкого порядка. Стандартное решение этой проблемы — увеличение числа узлов сетки в ANSYS Fluent, что влечет увеличение времени расчета и требует больше вычислительных ресурсов.

В ИТПМ СО РАН разрабатывается программный комплекс LOTRAN для расчета положения перехода к турбулентности в пограничных слоях течений вязкой сжимаемой и несжимаемой жидкости или газа [1]. LOTRAN работает в связке с ANSYS Fluent, в котором рассчитывается основное течение. Однако в LOTRAN используется линейная интерполяция данных о скорости из ANSYS Fluent на нормали к поверхности обтекаемого потока тела, что может приводить к разрывам в производных. Использование сглаживания профилей скорости, основанного на физике течения, может помочь улучшить качество прогноза положения ламинарно-турбулентного

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук. Регистрационный номер: ААА-А-А19-1190515 90050-2 (проект «Численные и экспериментальные исследования континуальных и разреженных течений применительно к задачам аэродинамики перспективных транспортных систем»).

© Н. В. Демиденко, А. В. Бойко, 2023

перехода на обтекаемом потоком теле без увеличения количества узлов расчетной сетки и времени расчета. Ранее для аппроксимации профилей скорости иногда использовали автомодельные профили.

В настоящей работе для этих целей предлагается использовать профили из двухпараметрического семейства профилей, подмножеством которого являются профили, получаемые при решении автомодельных уравнений Фолкнера — Скэна — Кука (однопараметрическое семейство), когда второй параметр равен нулю, аппроксимации профилей из ANSYS Fluent профилями из этих семейств методом наименьших квадратов и сравнении результатов [2]. Исследования проводились на нормали вдоль выбранной линии тока находящегося под углом атаки вытянутого сфероида и скользящего крыла.

Было показано, что аппроксимация профилей скорости пограничного слоя, предложенная в [2], обладает рядом преимуществ по сравнению с автомодельными профилями.

Список литературы

1. Boiko A. V., Demyanko K. V., Kirilovskiy S. V., Nechepurenko Y. M., Poplavskaya T. V. Modeling of transonic transitional three-dimensional flows for aerodynamic applications // AIAA J. 2021. № 59 (9). P. 3598–3610.

2. Gaster M. A two-parameter family of laminar boundary layer profiles on swept wings // 5th AIAA Theor. Fluid Mech. Conf. 2008. 4335. 6 p.

О НЕМОДОВОЙ ВРЕМЕННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПУАЗЕЙЛЯ В ТРУБЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ*

К. В. Демьянко^{1,2}, Н. В. Ключнев¹

¹Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН, 125047, Москва

²Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск

Традиционно анализ линейной временной устойчивости сдвиговых течений жидкости в каналах и трубах выполняется методом нормальных мод [1–3]. В рамках этого метода на основе линеаризованных относительно основного ламинарного течения уравнений движения жидкости исследуется эволюция во времени отдельных мод — трехмерных возмущений основного течения, заданных в начальный момент и гармонических по одному или двум направлениям. Скорости нарастания или затухания мод определяются по собственным значениям оператора (типа Орра — Зоммерфельда) линеаризованных уравнений. Данный подход позволяет судить об асимптотической устойчивости, по Ляпунову, основного течения к бесконечно малым возмущениям, в том числе определить линейное критическое число Рейнольдса, являющееся границей асимптотической устойчивости основного течения [2].

При числах Рейнольдса, больших линейного критического, обычно происходит естественный ламинарно-турбулентный переход вследствие экспоненциального роста отдельных неустойчивых мод. При числах Рейнольдса, меньших линейного критического, все достаточно малые возмущения затухают, но, возможно, немонотонно. Рост на конечных временных интервалах кинетической энергии малых возмущений и их дальнейшее нелинейное взаимодействие могут перевести основное течение в квазистационарное линейно неустойчивое состояние [1, 3]. В этом случае может произойти докритический ламинарно-турбулентный переход из-за развития вторичной неустойчивости. В частности, максимальная амплификация (подскок по отношению к начальному моменту времени) кинетической энергии возмущений достигается на так называемых оптимальных возмущениях, представляющих собой суперпозицию большого числа существенно неортогональных затухающих мод (немодовая неустойчивость).

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-71-10028).

© К. В. Демьянко, Н. В. Ключнев, 2023

Известно, что характеристики модовой неустойчивости течения Пуазейля в канале прямоугольного сечения существенно зависят от величины отношения длин сторон сечения [4–6]. В случае течения Пуазейля в трубе эллиптического сечения эти характеристики так же существенно зависят от отношения длин осей сечения [7]. В работе предложена численная модель для исследования временной немодовой неустойчивости этого течения [8]. В докладе обсуждаются новые результаты, полученные с помощью этой модели, включая зависимость максимальной амплификации средней плотности кинетической энергии возмущений от отношения длин осей эллиптического сечения, числа Рейнольдса и продольного волнового числа возмущений.

Список литературы

1. Schmid P.J., Henningson D.S. Stability and Transition in Shear Flows. N. Y.: Springer, 2000. 556 p.
2. Drazin P.G., Reid W.H. Hydrodynamic stability. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 258 p.
3. Boiko A.V., Dovgal A.V., Grek G.R., Kozlov V.V. Physics of transitional shear flows. Berlin: Springer, 2012. 272 p.
4. Tatsumi T., Yoshimura T. Stability of the laminar flow in a rectangular duct // J. Fluid Mech. 1990. Vol. 212. P. 437–449.
5. Theofilis V., Duck P.W., Owen J. Viscous linear stability analysis of rectangular duct and cavity flow // J. Fluid Mech. 2004. Vol. 505. P. 249–286.
6. Demyanko K.V., Nechepurenko Yu. M. Linear stability analysis of Poiseuille flow in a rectangular duct // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2013. Vol. 28, № 2. P. 125–148.
7. Kerswell R.R., Davey A. On the linear instability of elliptic pipe flow // J. Fluid Mech. 1996. Vol. 316. P. 307–324.
8. Demyanko K.V. Numerical model for the investigation of hydrodynamic stability of shear flows in pipes of elliptic cross-section // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2019. Vol. 34, № 6. P. 301–316.

ГЕТЕРОГЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ B_4C-CrV_2 , СИНТЕЗИРОВАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОВОЛОКНИСТОГО УГЛЕРОДА

Д. В. Дик^{1,2}, Т. С. Гудыма¹, А. А. Филиппов², Ю. Л. Крутский¹

¹Новосибирский государственный технический университет,
630073, Новосибирск

²Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск

Керамика на основе карбида бора из-за уникальных физико-механических свойств является привлекательным материалом для применений в различных отраслях промышленности [1]. Гетерогенные материалы на основе карбида бора с содержанием диборидов переходных металлов обладают улучшенными механическими свойствами. Незначительная растворимость металлов в карбиде бора уже существенно повышает микротвердость соединения, а равномерно распределенная вторая фаза (в виде диборида металла) препятствует росту зерен [2]. Существуют несколько способов изготовления композиционных порошков, используемых для приготовления керамики B_4C-CrV_2 : а) смешивание карбида бора и диборида хрома; б) смешивание бора, углерода и хрома [3, 4].

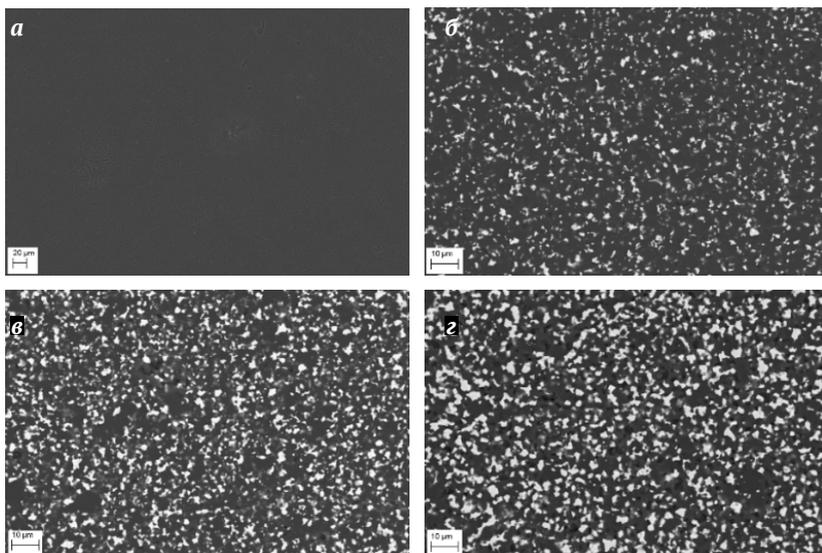
Получать керамику B_4C-CrV_2 можно следующими способами: а) получение порошков карбидоборным восстановлением оксида хрома с использованием нановолокнистого углерода и дальнейшее их горячее прессование; б) реакция карбидоборного восстановления одновременно с процессом горячего прессования. Свойства керамики, изготовленной такими способами, в литературе не описаны, не изучены различия свойств керамики, полученной методами а и б.

Шихты для изготовления керамики методом б предварительно смешивали в стехиометрических коэффициентах, дробили в шаровой мельнице и прессовали на компактном лабораторном горячем прессе (КТИ НП СО РАН, Россия) при максимальном давлении прессования 18 МПа, максимальной температуре 2000 °С, с выдержкой максимальных параметров в течение 10 мин в атмосфере аргона.

Для определения элементного состава образцов был проведен энергодисперсионный анализ. Экспериментальные данные сходятся с теоретическими.

На рисунке приведены снимки растровой электронной микроскопии (РЭМ) образцов керамических материалов, синтезированных при раз-

ном составе шихты. Размер агрегатов CrB_2 растет с увеличением концентрации данного соединения. Для образца 10 мол.% CrB_2 он не превышает 2 мкм, для образцов 20 и 30 мол.% CrB_2 — 3 мкм.



Снимки РЭМ композиционных материалов $\text{B}_4\text{C}-\text{CrB}_2$, синтезированных для составов, мол.% CrB_2 : а — 0; б — 10; в — 20; г — 30

На снимках образцов можно наблюдать равномерное распределение частиц двухфазной системы во всем объеме для всех образцов. На количество и размер пор влияют два фактора: количество газов, выделяющихся в ходе реакции, и количество пластичной фазы CrB_2 , заполняющей поры. Для 20 мол.% эти параметры близки к оптимальным.

Список литературы

1. Zhang X., Gao H., Shang Z., Wen R., Wang G., Mu J., Che H. Effect of pressure on densification behavior, microstructures and mechanical properties of boron carbide ceramics fabricated by hot pressing // *Ceramics Int.* 2017. Vol. 43. P. 6345–6352.
2. Thévenot F. Boron carbide-A comprehensive review // *J. Eur. Ceram. Soc.* 1990. № 4 (6). С. 205–225.
3. Yamada S., Hirao K., Yamauchi Y. and Kanzaki S. Sintering behavior of $\text{B}_4\text{C}-\text{CrB}_2$ ceramics // *J. Mater. Sci. Lett.* 2002. Vol. 21. P. 1445–1447.
4. Suzuya Yamada, Kiyoshi Hirao, Yukihiko Yamauchi S.K. $\text{B}_4\text{C}-\text{CrB}_2$ composites with improved mechanical properties // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2003. Vol. 23. P. 561–565.

УДОВЛЕТВОРЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЛОПАСТЕЙ НЕСУЩИХ ВИНТОВ ВЕРТОЛЕТОВ

Ю. Ю. Евдокимов, В. Д. Вермель, И. В. Трифионов, А. В. Усов

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)*

Важнейшим этапом в создании перспективных вертолетов различного назначения является разработка аэродинамических компоновок лопастей несущих винтов с повышенными аэродинамическими характеристиками, обеспечивающими эффективную эксплуатацию на всех режимах полета. Его выполнение связано с необходимостью проведения значительного объема экспериментальных исследований по отработке аэродинамической компоновки лопастей на аэродинамических моделях, обеспечивающих определение суммарных и распределенных аэродинамических характеристик, шарнирных моментов лопастей, переменных изгибающих и крутящих моментов, а также переменных динамических нагрузок, передающихся от моделей несущих винтов на весы вертолетного прибора для прогноза вибро-состояния вертолета.

Для обеспечения адекватности эксперимента условиям натурального полета необходимым является соответствие модели определенным критериям подобия, в числе которых геометрическое, массово-инерционное, жесткостное, а также аэродинамическое по условиям обтекания в трубном эксперименте, определяемом близостью чисел Маха (M) и Рейнольдса (Re). Обеспечение указанных требований возможно при проведении экспериментальных исследований с использованием крупномасштабных аэродинамических моделей несущих винтов вертолетов в аэродинамической трубе Т-104 ЦАГИ. При этом диаметр модели винта составляет ~ 5 м.

В настоящей работе рассматривается разработка типовой конструкции крупномасштабных аэродинамических моделей лопастей с широким применением отечественных полимерных композиционных материалов, обеспечивающей подобие натурным лопастям.

Была проведена оптимизация конструктивных параметров лонжерона — основного силового элемента конструкции в зависимости от профилировки модели лопасти и действующих нагрузок [1].

Рассмотрено расчетно-экспериментальное определение аэродинамической нагрузки на крупномасштабные модели лопастей несущих вертолетных винтов при их вращении на винтовом приборе в потоке воздуха в рабочей части аэродинамической трубы [2].

Отдельной задачей является подтверждение прочностных и ресурсных характеристик изготавливаемых моделей лопастей. Проведенные экспериментальные исследования с использованием конструктивно подобных образцов наиболее нагруженных отсеков моделей лопастей подтвердили высокую сходимость результатов с проектировочным расчетом на прочность.

Обеспечение безопасности проведения эксперимента, а также целого ряда требований (к массово-инерционному подобию, варьированию положения центров масс, изменению резонансных частот, балансировке комплектов лопастей, в том числе при размещении измерительной аппаратуры) может удовлетворяться с помощью присоединенных масс. Использование данного метода связано с обеспечением при разработке конструкции, с одной стороны, запаса по массе модели, а с другой — возможности присоединения балансировочных грузов при подготовке эксперимента.

Проведена оценка производственных погрешностей, а также возможных отклонений массовых характеристик, используемых в конструкциях компонентов ПКМ, и их влияния на изменение массово-инерционных характеристик моделей лопастей [3]. Определен перечень ключевых деталей конструкции, контроль изготовления которых необходим в первую очередь. Показано, что для изготовления моделей лопастей с требуемыми массовыми характеристиками (с вероятностью 95 %) необходимой становится разработка конструкции с уменьшенной на ~6,5 % массой по сравнению с заданной.

Список литературы

1. Вермель В.Д., Евдокимов Ю.Ю., Качарава И.Н., Николаев П.М., Трифонов И.В., Чернышев Л.Л. Оптимизация конструктивных параметров лонжерона крупноразмерной лопасти аэродинамической модели несущего винта вертолета // Автоматизация в промышленности. 2021. № 5. С. 24–27.
2. Евдокимов Ю.Ю., Еремин М.М., Трифонов И.В., Усов А.В. Определение аэродинамической нагрузки для разработки крупномасштабных моделей лопастей несущих вертолетных винтов // Авиационная промышленность. 2020. № 1–4. С. 82–86.
3. Вермель В.Д., Евдокимов Ю.Ю., Кулеш В.П., Трифонов И.В., Усов А.В., Чернышев Л.Л., Шардин А.О. Обеспечение требований к массово-инерционным характеристикам моделей лопастей несущих вертолетных винтов из ПКМ в условиях производственных погрешностей // Авиационная промышленность. 2019. № 1. С. 35–40.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С ГИБРИДНЫМ АРМИРОВАНИЕМ*

А. В. Еремин, М. В. Бурков, А. А. Кононова, П. С. Любутин

*Институт физики прочности
и материаловедения СО РАН, 634055, Томск*

Полимеры, армированные непрерывными волокнами, имеют отличные эксплуатационные характеристики и широкие возможности по созданию более эффективных конструкций, чем из традиционных однородных материалов. Однако существенными недостатками слоистых полимерных композитов являются низкая ударная вязкость и склонность к появлению расслоений, что приводит к снижению прочности.

Одним из имеющихся подходов к снижению недостатков является использование возможностей композитов для применения гибридного армирования. Оно может быть выполнено как в виде дисперсного наполнения к уже имеющимся непрерывным волокнам или тканям, так и комбинированием различных волокон или тканей в слоях, а также использованием обоих подходов в одном материале.

Добавление к слоистым полимерным композитам углеродных нанотрубок (УНТ) оказывает значительное влияние на статическую прочность при разных видах нагружения, а также вязкость разрушения [1–3]. Задачи исследования ударных характеристик и механического поведения после появления повреждения также исследуются, в частности влияние волокон на характер повреждения и разрушения при ударе, влияние подкрепляющих элементов на ударные свойства, модификация механических характеристик и ударной вязкости путем выращивания нанотрубок на поверхности волокон и др. [4–6].

При добавлении УНТ к углепластику удается повысить широкий набор его механических характеристик. В частности, циклическую долговечность с 51 400 циклов для исходного материала до 813 600 циклов при 0,5 % УНТ.

Комбинирование типов укладки углеродных однонаправленных лент, плетеных углеродных тканей или плетеных арамидных тканей в различных соотношениях позволяет варьировать прочность при растяжении, долю нелинейной деформации в материале и механизм распределения напряжений,

* Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 21-79-10385).

© А. В. Еремин, М. В. Бурков, А. А. Кононова, П. С. Любутин, 2023

что гарантированно повлияет на прочностные характеристики и при ударном воздействии.

При использовании квазиизотропных ламинатов наличие слоев, в которых ткани или волокна ориентированы под углом $\pm 45^\circ$ к оси нагружения, усложняет механическое поведение. Появляется вращательная мода деформации, а также сдвиг в плоскости образца.

Рассматривая армирующие слои только под углом $\pm 45^\circ$, можно увидеть, что локализация деформаций в композитах на основе арамидных и углеродных волокон происходит по-разному. При низком уровне деформации податливые арамидные волокна хорошо распределяют нагрузку по всей площади образца.

Жесткие углеродные волокна не могут достичь такого распределения, и деформации локализованы вдоль плоскостей сдвига. В первую очередь это вызвано неравномерной укладкой, когда отсутствует предварительное натяжение волокон и напряжения передаются неравномерно.

При высоком уровне деформации наблюдается обратная ситуация. Благодаря высокой податливости арамидный композит легко достигает нелинейной стадии, релаксируя внешнюю нагрузку за счет значительной локальной неупругой деформации. Углеродные волокна при высоких нагрузках перестраиваются и вовлекаются в несущую способность композита более равномерно, сохраняя при этом линейное поведение.

Список литературы

1. Mikhilchan A., Ridha M., Tay T.E. Carbon nanotube fibres for CFRP-hybrids with enhanced in-plane fracture behaviour // *Mater Des.* 2018. Vol. 143. P. 112–119.
2. Han K., Zhou W., Qin R., Yang S., Ma L.-H. Progressive Damage Analysis of Carbon Fabric-reinforced Polymer Composites under Three-point Bending // *Fibers Polym.* 2021. Vol. 22. P. 469–479.
3. Boroujeni A. Y., Al-Haik M. S. Interlaminar fracture toughness of hybrid carbon fiber-carbon nanotubes-reinforced polymer composites // *Polym. Compos.* 2019. Vol. 40. P. 1470–1478.
4. Xiao J., Shi H., Tao L., Qi L., Min W., Zhang H., Yu M., Sun Z. Effect of fibres on the failure mechanism of composite tubes under low-velocity impact // *Materials.* 2020. Vol. 13, iss. 18. P. 4143.
5. Wang C., Ren T., Miao Y., Suo T., Tang Z., Li Y. High-velocity impact response of CFRP panels reinforced with stiffeners // *Composite Structures.* 2020. Vol. 246. P. 12392.
6. Wu Y., Dhamodharan D., Wang Z., Wang R., Wu L. Effect of electrophoretic deposition followed by solution pre-impregnated surface modified carbon fiber-carbon nanotubes on the mechanical properties of carbon fiber reinforced polycarbonate composites // *Composites Part B: Engineering.* 2020. Vol. 195. P. 108093.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДКРЕПЛЕННОЙ ПАНЕЛИ С УЧЕТОМ СОВМЕСТНОСТИ ИЗГИБНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

А. М. Зайцев

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)*

Аналитический расчет устойчивости подкрепленных панелей представляет собой сложную математическую задачу, решение которой может быть найдено только в частных случаях при простых граничных условиях [1]. Затруднения возникают, прежде всего, при решении системы из частных дифференциальных уравнений изгиба составных элементов панели, дополненной условиями силовой и деформационной совместности. Предложенная С. П. Тимошенко энергетическая модель панели позволяет в значительной степени упростить решение этой задачи [2]. При этом в ряде случаев обеспечивается достаточная для практического применения точность. Однако в энергетической модели явным образом не обеспечивается совместность деформирования пластины и подкрепляющих ребер. Это может приводить к некорректным результатам применения метода в случае расположения подкрепляющих ребер с эксцентриситетом относительно срединной поверхности пластины.

В работе предложено уточнение энергетической модели подкрепленной панели в части обеспечения совместности деформаций изгиба пластины и подкрепляющих ребер по линии их контакта. Для этого модель С. П. Тимошенко дополнена компонентами потенциальной энергии деформирования пластины от мембранных напряжений и стрингера от продольных усилий [1]. При этом возникающие в составных элементах панели усилия найдены при решении задачи совместности деформирования. Показано, что для участка пластины, расположенного между ребрами, справедлива функция напряжения Эри задачи плоской теории упругости в форме записи Файлона (Белзецкого) [3]. Продемонстрировано решение задачи общей потери устойчивости подкрепленной панели при сжатии для трех конструктивных вариантов: широкая панель, панель с одним ребром, панель с большим количеством ребер. Проведен сравнительный анализ результатов расчета по разработанному методу с конечно-элементным моделированием

ем, который подтвердил достоверность подхода и правильность принятых предположений.

Список литературы

1. Постнов В. А., Тумашик Г. А. Оптимизация подкрепленной ребрами пластины по критерию устойчивости // Проблемы прочности и пластичности. 2005. Вып. 67. С. 60–72.
2. Тимошенко С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М.: Наука, 1971.
3. Папкович П. Ф. Теория упругости. М.: Оборонгиз, 1939.

О ВЫЧИСЛЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДВУМЕРНЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ*

Г. В. Засько¹, А. В. Бойко^{1,2}, К. В. Демьянко¹, Ю. М. Нечепуренко¹

¹Институт вычислительной математики
им. Г. И. Марчука РАН, 119333, Москва

²Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск

Оптимальными возмущениями называют возмущения основного (ламинарного) течения, достигающие наибольшей амплификации плотности энергии на конечных временных или пространственных интервалах. Они широко используются в аэродинамике и гидродинамике, в частности для описания обходного сценария ламинарно-турбулентного перехода [1]. Пространственные оптимальные возмущения ламинарных погранслоевых течений были впервые вычислены в работах для пограничного слоя Блазиуса, а позже — для пограничных слоев Фолкнера – Скэна – Кука и над слабоогнутой поверхностью, для течения в канале постоянного сечения и других течений [1–5].

При исследовании линейной пространственной устойчивости двумерных ламинарных пограничных слоев рассматривают трехмерные, гармонические по времени и поперечному направлению возмущения малой амплитуды. Развитие этих возмущений вниз по потоку описывают с помощью линейаризованных относительно основного течения уравнений Навье – Стокса, из которых выводят уравнения для амплитуд возмущений. Начально-краевая задача для таких уравнений допускает как решения, не нарастающие либо слабо нарастающие вниз по потоку, так и решения, сильно нарастающие вниз по потоку [6]. Последние не реализуются на практике из-за фактических граничных условий на выходе, которые заранее неизвестны. Поэтому сильно нарастающие моды необходимо исключить из решения другими способами. Одним из таких подходов является отбрасывание слагаемых, отвечающих за вязкую диссипацию в продольном направлении и продольную компоненту градиента давления из уравнений для амплитуд возмущений. Этот подход использовался в упомянутых работах [1–4].

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-11-00025).

© Г. В. Засько, А. В. Бойко, К. В. Демьянко, Ю. М. Нечепуренко, 2023

Данный доклад посвящен оригинальной технологии вычисления пространственных оптимальных возмущений, включающей в себя следующие элементы новизны:

- эффективную пространственную аппроксимацию линеаризованных уравнений по вертикальному направлению методом Галеркина — коллокаций с использованием элементарных функций Лагерра;
- численное интегрирование возмущений вниз по потоку на основе полных (без отбрасывания слагаемых) уравнений для амплитуд возмущений с использованием спектральной редукции, когда на каждом шаге интегрирования решение проектируется на подпространство локальных собственных мод не нарастающих или слабо нарастающих вниз по потоку;
- вычисление матрицы фундаментальных решений.

Искомые оптимальные возмущения определяются вычисленной матрицей фундаментальных решений. Отметим, что предложенная технология позволяет в том числе вычислить базис пространственных оптимальных возмущений, который представляет самостоятельный интерес.

Список литературы

1. Andersson P., Berggren M., Henningson D. S. Optimal disturbances and bypass transition in boundary layers // *Phys. Fluids*. 1999. Vol. 11, № 1. P. 134–150.
2. Luchini P. Reynolds-number-independent instability of the boundary layer over a flat surface: optimal perturbations // *J. Fluid Mech.* 2000. Vol. 404. P. 289–309.
3. Tempelmann D., Hanifi A., Henningson D. S. Spatial optimal growth in three-dimensional boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2010. Vol. 646. P. 5–37.
4. Boiko A. V., Ivanov A. V., Kachanov Yu. S., Mischenko D. A., Nechepurenko Yu. M. Excitation of unsteady Goertler vortices by localized surface non-uniformities // *Theor. Comput. Fluid Dyn.* 2017. Vol. 31. P. 67–88.
5. Boiko A. V., Demyanko K. V., Nechepurenko Yu. M. Numerical analysis of spatial hydrodynamic stability of shear flows in ducts of constant cross-section // *Comp. Math. Math. Phys.* 2018. Vol. 58. № 5. P. 700–713.
6. Tumin A., Reshotko E. Spatial theory of optimal disturbances in boundary layers // *Phys. Fluids*. 2001. Vol. 13, № 7. P. 2097–2104.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РОСТА НЕМОДАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ В КРУГЛОЙ СТРУЕ*

О. О. Иванов, Л. Р. Гареев, Д. А. Ашуров, В. В. Веденеев

Научно-исследовательский институт механики
МГУ им. М. В. Ломоносова, 119192, Москва

В сдвиговых течениях наряду с классическим сценарием перехода к турбулентности, при котором в потоке на линейной стадии развития наблюдается экспоненциально нарастающее возмущение, существует другой тип неустойчивости — немодальный, или алгебраический. В пограничных слоях немодальная неустойчивость хорошо изучена и приводит к так называемому байпасному переходу к турбулентности, однако в затопленных струях этот механизм экспериментально не изучался.

В данной работе исследовалось немодальное возмущение, возникающее в затопленной струе с длинным ламинарным участком, при установке в поток специальных возмущающих конструкций — «дефлекторов» [1, 2]. Они представляют собой тонкую, почти цилиндрическую деталь, входное сечение которого представляет окружность, а выходное — возмущенную синусоидально окружность с определенным азимутальным волновым числом.

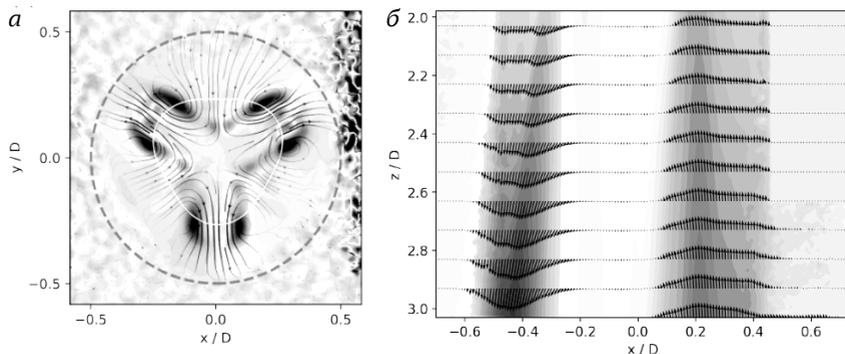
С помощью метода PIV было показано, что для каждого азимутального числа n в возмущении наблюдается n пар противовращающихся продольных вихрей (например, для $n = 3$, см. рисунок, *a*), обуславливающих *lift-up* механизм неустойчивости течения: они перемещают медленно движущуюся жидкость в сторону оси, а быстро движущуюся — в сторону периферии. Продольная скорость $V_z(z)$ (см. рисунок, *b*) возмущения нарастает линейно в зависимости от продольной координаты z , а поперечная составляющая скорости возмущения V_x мала относительно максимума скорости основного течения U и изменяется слабо, а энергия возмущения $K(z)$ растет квадратично.

Экспериментально созданное возмущение качественно соответствует теоретическим расчетам немодального оптимального (наиболее быстро растущего с точки зрения энергии) возмущения, однако не представляется возможным количественно сравнить напрямую теорию и эксперимент, а именно соответствующие коэффициенты нарастания возмущения k . Чтобы обойти это препятствие, было предложено два подхода для норми-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (№ 20-19-00404).

© О. О. Иванов, Л. Р. Гареев, Д. А. Ашуров, В. В. Веденеев, 2023

ровки кинетической энергии возмущения. В первом подходе по линейной зависимости максимума продольной скорости $V_{z,max}(z)$ от z находится «виртуальное» начало возмущения z_0 , в которое экстраполируется значение $K(z)$, равное приблизительно начальной кинетической энергии поперечного возмущения — энергии продольных вихрей, которая должна меняться слабо. Во втором подходе для оценки коэффициентов нарастания используются измеренные максимальные и минимальные значения кинетической энергии поперечного движения, полученные в эксперименте.



Структура возмущения для $n = 3$: a — в поперечной плоскости; b — в продольной плоскости

Первый и второй метод для различных n дали сходные значения $\kappa \sim 1-5$, в то время как в теории полученные значения на порядок больше: $\kappa \sim 30-50$. Полученная разница на один порядок обуславливается тем, что в теоретических расчетах находилось наиболее быстрорастущее возмущение, в то время как в эксперименте моделировалось возмущение, подобное немодальному, и не ставилась задача обеспечить его наибольший рост.

Во второй части обсуждается взаимодействие немодальной и модальной устойчивостей для различных n и частот модального возмущения [2].

Список литературы

1. Зайко Ю. С., Решмин А. И., Тепловодский С. Х., Чичерина А. Д. Исследование затопленных струй с увеличенной длиной начального ламинарного участка // Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 1. С. 97–106.
2. Gareev L. R., Zayko J. S., Chicherina A. D., Trifonov V. V., Reshmin A. I., Vedeneev V. V. Experimental validation of inviscid linear stability theory applied to an axisymmetric jet // J. Fluid Mech. 2022. Vol. 934. A3.

УТИЛИЗАЦИЯ ОБРАЗЦОВ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. В. Иордан

*Омский государственный
технический университет, 644050, Омск*

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований утилизации путем сжигания демонстрационных образцов, представляющих собой элементы отработавших частей ракет-носителей таких, как головной обтекатель, хвостовой и межступенной отсеки, с помощью различных высокоэнергетических материалов. Данное исследование является развитием концепции утилизации отделяющихся частей ракет-носителей после выполнения своей миссии путем сжигания на атмосферном участке траектории спуска и направлено на решение проблемы негативного воздействия ракетно-космической деятельности на окружающую среду в части сокращения площадей, выделяемых под районы падения отделяющихся частей, а также повышение экономической эффективности в части снижения стоимости пуска ракеты-носителя за счет исключения затрат на содержание, эксплуатацию районов падения отделяющихся частей от ракеты-носителя при выведении полезных нагрузок, поиск, вывоз и последующую утилизацию этих частей [1].

Рассматривается задача определения геометрического облика демонстрационного образца из полимерного композиционного материала, удовлетворяющего требованиям термopочности на участке выведения и одновременно обеспечивающего утилизацию путем сжигания на траектории спуска в заданном интервале полета.

Представлены результаты исследований нескольких итераций предложенной концепции: от подвода теплоты в процессе горения высокоэнергетических материалов таких, как пиротехнические составы, смесевые твердые ракетные топлива, внесенные в трехслойную конструкцию образца оболочки головного обтекателя, до замены материалов и формы конструкции как отдельных слоев в трехслойном образце, так и всей трехслойной конструкции [2–4].

Список литературы

1. Фадеев А. С., Аверкин Н. Ф. Проблемные вопросы использования трасс запусков космических аппаратов и районов падения отделяющихся частей ракет космического назначения. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. 372 с.

2. Trushlyakov V., Zharikov K. Interaction of the gas-vapor mixture and air on the condition drainage system of space launch vehicles when filling cryogenic propellant // Procedia Eng. 2017. Vol. 174. P. 11–18.

3. Корчагин М. А., Гаврилов А. И., Зарко В. Е., Кискин А. Б., Иордан Ю. В., Трушляков В. И. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в механически активированных смесях карбида бора с титаном // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53, № 6. С. 58–66.

4. Trushlyakov V.I., Panichkin A.V. Methodology for the design of combustible structures of separating launch vehicle parts // J. Spacecraft Rockets. 2021. Vol. 58, iss. 4. P. 1200–1206.

О ВЛИЯНИИ ТОЛЩИНЫ И ХАРАКТЕРА СОПРЯЖЕНИЯ ЗАЩИТНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ПРОСЛОЙКИ НА КОНТАКТ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ*

А. А. Каменских, А. С. Крысина

Пермский политехнический университет, 614990, Пермь

Защитные полимерные покрытия и прослойки используются во многих отраслях промышленности: оптике, строительстве, машиностроении, нефтепользовании и т. д. [1, 2]. При этом интересен вопрос о влиянии характера контактного сопряжения объема полимерного материала с металлическими и неметаллическими поверхностями взаимодействия. Исследование влияния характера сопряжения прослойки с внешними объектами необходимо рассматривать как на тестовых задачах, так и в реальных конструкциях.

В данной работе выполнена попытка оценить влияние характера контакта на границе сопряжения прослойки 3 — полупространства 2 при деформировании слоя скольжения жестким стальным сферическим индентором 1. Расчетная схема представлена на рис. 1.

На поверхности контакта S_{K_1} реализовано фрикционное контактное взаимодействие. На поверхности контакта S_{K_2} осуществлено три варианта контактного взаимодействия: идеальный контакт, полная адгезия и фрикционный контакт. В качестве материалов защитного слоя рассмотрено 7 материалов: антифрикционные полимеры и композиты на их основе. Моделирование выполнено при стандартном постоянном для всех пар материалов коэффициенте трения 0,04 (справочный коэффициент). Сила индентирования постоянная 1000 Н. Толщина прослойки h_p изменяется от 4 до 12 мм.

Для примера на рис. 2 представлен характер распределения параметров контакта на S_{K_1} при разном характере сопряжения S_{K_2} для прослойки толщиной 4 мм, изготовленной из модифицированного фторопласта.

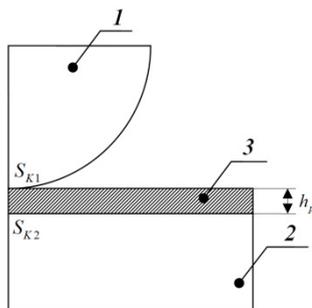


Рис. 1. Расчетная схема

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-48-596009).
© А. А. Каменских, А. С. Крысина, 2023

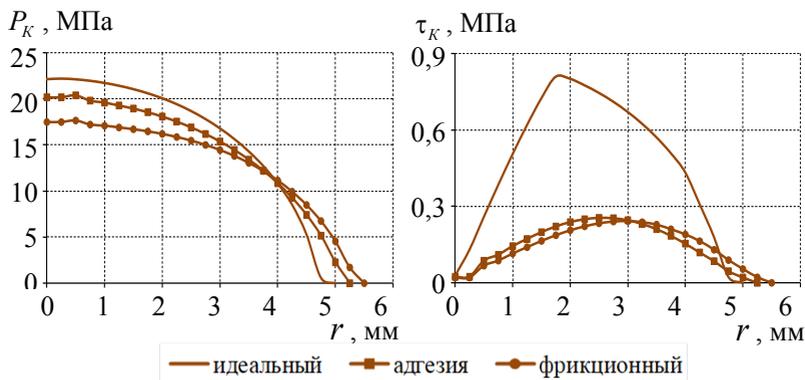


Рис. 2. Параметры зоны контакта S_{K_1} при разном сопряжении S_{K_2} :
 a — контактное давление; b — контактное касательное напряжение

Идеальный контакт, реализованный посредством создания конечно-элементной сетки узел в узел, дает сильно завышенные результаты по параметрам зоны контакта. Моделирование полного прилипания поверхностей при помощи контактной пары позволяет более правильно описать сопряжения «рваная резьба». Фрикционный контакт моделирует условия взаимодействия, соответствующие сопряжению с полированной стальной плитой.

Список литературы

1. Adamov A. A., Kamenskikh A. A., Pankova A. P. Influence analysis of the antifriction layer materials and thickness on the contact interaction of spherical bearings elements // Lubricants. 2022. Vol. 10, № 2. Art. 30.
2. Lesnikova Y. I., Trufanov A. N., Kamenskikh A. A. Analysis of the Polymer Two-Layer Protective Coating Impact on Panda-Type Optical Fiber under Bending // Polymers. 2022. Vol. 14, iss. 18. Art. 3840.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЦЕДУРА ЧИСЛЕННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПОВЕДЕНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

А. А. Каменских, Ю. О. Носов

Пермский политехнический университет, 614990, Пермь

Сферические опорные части мостовых строений включают углубления для смазочного материала разной геометрии в антифрикционных полимерных слоях скольжения, которые заполняются пастообразными смазочными материалами. В рамках исследования было выполнено моделирование сферических опорных частей с разной конфигурацией углублений под смазку при разных схемах заполнения полимерных прослоек углублениями [1]. В первом приближении смазка моделировалась как малосжимаемый материал. Для более качественного описания моделей поведения смазочного материала требуется серия натурных экспериментов, направленных на определение физико-механических и реологических характеристик смазки. В [2] выполнено исследование свойств ЦИАТИМ-221 (смазочный материал, широко используемый в узлах терния), но процедура численной идентификации показала недостаточность экспериментальных данных для построения моделей поведения смазки. Таким образом, возникла необходимость в проведении серии натурных экспериментов в широком диапазоне температур. Для экспериментального исследования выбраны четыре наименования смазочного материала: ЦИАТИМ-221, ЦИАТИМ-221F, ТОМФЛОН СБС 240 FM и ТОМФЛОН СК 170 FH. Исследования свойств смазочных материалов выполнено на базе лаборатории пластмасс ФГАОУ ВО «ПНИПУ».

На основе экспериментальных данных установлено, что для описания поведения смазок подходят уравнения максвелловского типа [2]. В качестве определяющих соотношений использованы две модели вязкоупругости PRONY и ANAND, построена процедура численной идентификации с применением многопараметрической оптимизации при помощи метода Нелдера — Мида (рис. 1).

Для верификации математических моделей с экспериментальными данными моделируется численный эксперимент на чистый сдвиг (рис. 2) для определения касательных напряжений испытательного образца.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-29-01313).
© А. А. Каменских, Ю. О. Носов, 2023

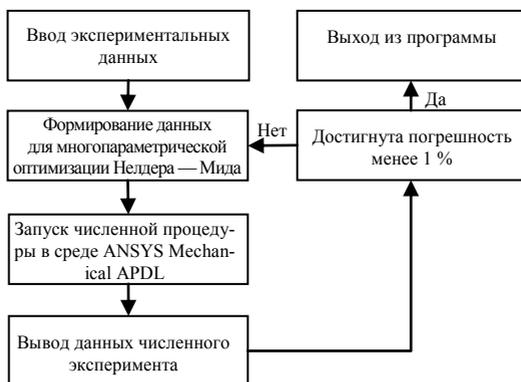


Рис. 1. Схема численной процедуры идентификации свойств смазки

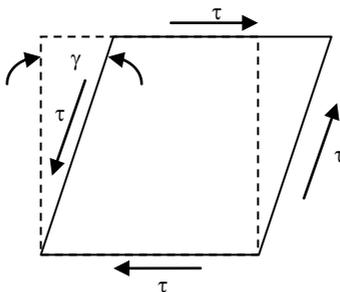


Рис. 2. Эксперимент на чистый сдвиг

Численная процедура позволяет провести идентификацию математических моделей поведения замазочных материалов. Модели поведения имплантированы в прикладной пакет ANSYS и верифицированы в рамках серии экспериментов на чистый сдвиг. Проводятся исследования деформирования смазочных материалов в углублениях под смазку в полимерных антифрикционных прослойках на модельных задачах.

Список литературы

1. Nosov Y.O., Kamenskikh A.A. Influence analysis of lubricant recesses on the working capacity of the bridge span spherical bearing // Lubricants. 2022. Vol. 10. Art. 283.
2. Нечаева А. В. Реологические свойства смазки ЦИАТИМ-221 // Материалы региональной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Физика для Пермского края». 2016. С. 67–71.

АНАЛИЗ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАГРУЗОК ОТ МОСТОВОГО ПРОЛЕТА НА РАБОТУ КОНТАКТНОГО УЗЛА ОПОРНОЙ ЧАСТИ*

А. А. Каменских, А. П. Панькова

Пермский политехнический университет, 614990, Пермь

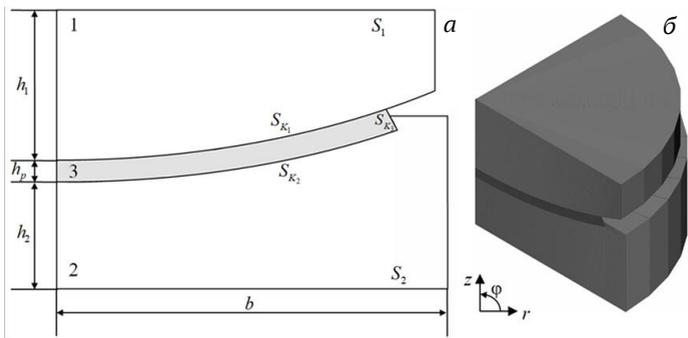
Мостовые сооружения — ответственные конструкции, к которым предъявляются большие требования по надежности, долговечности, экономичности и экологичности. Опорные части являются сердцем мостовых пролетных сооружений, так как равномерно распределяют нагрузки на опоры, возникающие от внешних факторов. В связи с этим к ним предъявляются такие же высокие требования, как и к мостовым пролетным строениям. Существует большое разнообразие видов геометрических конфигураций опорных частей мостов [1]. Многие из них устарели, а некоторые начинают набирать оборот производства. Но все же актуальным вопросом в задачах об опорных частях является правильный подбор геометрической конфигурации опорной части в целом и слоя скольжения в частности, материала слоя скольжения и других параметров в зависимости от воспринимающей нагрузки при работе конструкции.

Ранее исследовательской группой был рассмотрен достаточно большой набор параметров, которые так или иначе влияют на деформационное поведение конструкции опорной части Л-100, производства ООО «АльфаТех» (см. рисунок) [2].

К исследуемым параметрам относятся угол наклона торца, расположение и глубина внедрения в нижнюю стальную плиту слоя скольжения, геометрическое оформление вырезов под смазочный материал и т. д. Однако данные параметры рассматривались только при воздействии номинальной вертикальной нагрузки 1000 кН, а для более точного описания поведения опорной части необходимо рассмотреть комплексное взаимодействие вертикальной и горизонтальной нагрузок.

В рамках данной работы рассмотрено влияние учета комплексного взаимодействия нагрузок на деформационное поведение опорной части в целом и контактные параметры слоя скольжения в частности. Рассматриваются антифрикционные полимерные прослойки разной толщины: 4 (стандартная толщина), 6, 8, 10 и 12 мм.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-29-01313).
© А. А. Каменских, А. П. Панькова, 2023



Расчетная модель сферической опорной части:
 а — расчетная схема; б — трехмерный вид конструкции

Получены качественные и количественные закономерности деформационного поведения конструкции сферической опорной части заданной геометрической конфигурации.

Список литературы

1. Eggert H., Kauschke W. Structural Bearings — Ernst & Sohn: Berlin, Germany, 2002. 405 p.
2. Adamov A.A., Kamenskikh A.A., Pankova A.P., Strukova V.I. Comparative analysis of the work of bridge spherical bearing at different antifriction layer locations // Lubricants 2022. Vol. 10, iss. 9. Art. 207. P. 1–20.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ В МОДЕЛИ ДЖОНСОНА — СИГАЛМАНА С НЕСКОЛЬКИМИ ВРЕМЕНАМИ РЕЛАКСАЦИИ*

С. Р. Кармушин

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

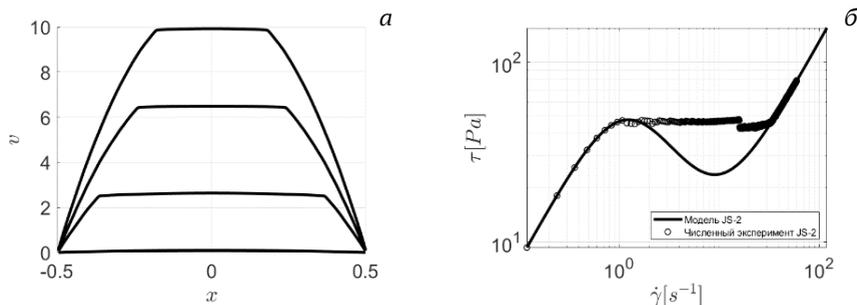
Одной из характерных особенностей движения вязкоупругих сред, привлекающих внимание исследователей, является аномальное поведение жидкости при определенных параметрах течения. Ярким проявлением развития неустойчивости потока является эффект сдвигового расслоения (*shearbanding*), когда в течении неньютоновской жидкости возникает конечное число однонаправленных слоев, отличающихся скоростью сдвига. Это явление охватывает широкий класс течений, характеризующихся возникновением внутренних разрывов и в конечном итоге приводит к резкому уменьшению сопротивления при транспортировке вязкоупругих жидкостей в каналах и трубах.

В работе [1] предложена и проанализирована нелинейная модель Джонсона — Сигалмана — Олдройда, которая объединяет в себе модель Джонсона — Сигалмана с несколькими временами релаксации и подход с введением искусственной ньютоновской вязкости в законе сохранения импульса. Ключевая особенность этой модели — немонотонная зависимость стационарного напряжения сдвига от скорости сдвига, представленная на рисунке, *a*. Это приводит к образованию контактных разрывов в стационарном течении, когда градиент давления превышает некоторое критическое значение. Благодаря этой особенности модель позволяет описывать различные неустойчивости потока, включая *shearbanding*. В работе [2] исследовано течение Куэтта в рамках модели Джонсона — Сигалмана с двумя временами релаксации (JS-2), которая в отсутствие ньютоновской вязкости является гиперболической в классе одномерных течений. Была построена численная модель для расчета нестационарных решений с учетом сдвигового расслоения потока.

* Результаты исследования были использованы при выполнении промышленного проекта по моделированию трехмерного течения геля ГРП в проппантной пачке.

© С. Р. Кармушин, 2023

В данной работе рассмотрены одномерные нестационарные течения несжимаемой вязкоупругой жидкости между параллельными пластинами и в трубе (течение Пуазейля) в рамках модели Джонсона — Сигалмана с двумя временами релаксации. Проведены нестационарные расчеты различных режимов течения, продемонстрировано возникновение внутренних линий скольжения при увеличении скорости потока (*shearbanding*). Построены стационарные решения и исследована их структура (см. рисунок, б). Показано, что стационарные решения с внутренними линиями скольжения могут быть получены как численный предел нестационарных течений. Выведен алгоритм отбора таких стационарных решений, позволяющий выбрать из однопараметрического семейства разрывных решений то, которое асимптотически реализуется в нестационарном расчете. На основе нестационарных расчетов построены диаграммы зависимости напряжения сдвига от скорости для течений Куэтта и Пуазейля. Проанализировано явление гистерезиса при циклическом изменении скорости потока.



Структура течения в модели Джонсона — Сигалмана с двумя временами релаксации: *a* — диаграмма зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига и соответствующие ей результаты численных экспериментов; *б* — серия профилей скорости в зависимости от градиента давления в плоском стационарном течении Пуазейля (в безразмерных координатах)

Список литературы

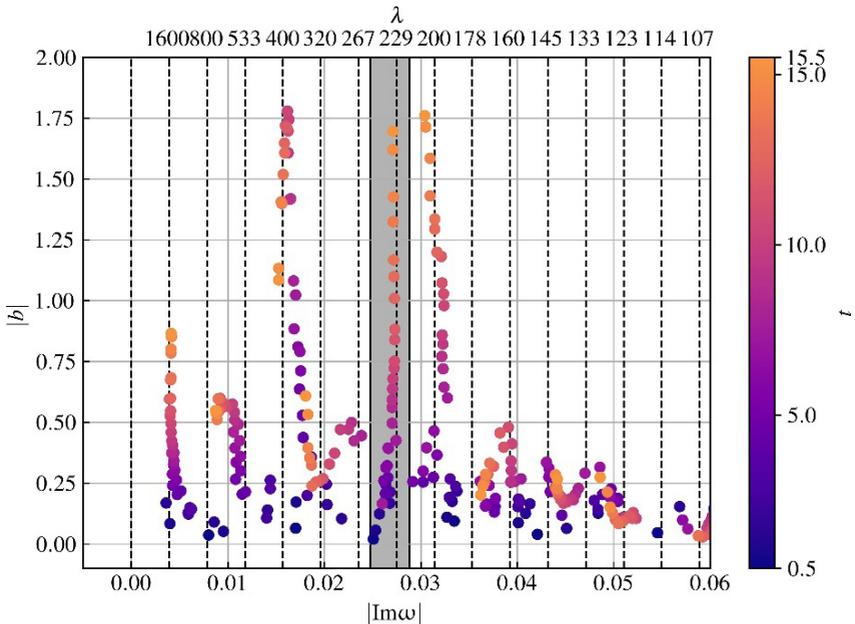
1. Malkus D. S., Nohel J. A., Plohr B. J. Analysis of new phenomena in shear flow of non-newtonian fluids // SIAM J. Appl. Math. 1991. Vol. 51, № 4. P. 899–929.
2. Ляпидевский В. Ю. Течение Куэтта вязкоупругой среды максвелловского типа с двумя временами релаксации // Тр. МИАН. 2018. Т. 300. С. 146–157.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ДАЛЬНОГО ВИХРЕВОГО СЛЕДА ЗА САМОЛЕТОМ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛОЖЕНИЯ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ МОДАМ

Н. А. Ключев

Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)

Метод разложения по динамическим модам (*dynamic modedecomposition*, DMD) был представлен в работе для анализа результатов расчетов и экспериментов в области гидродинамики [1]. Центральной идеей метода DMD является поиск собственных чисел и векторов линейного оператора эволюции системы по конечномерным векторам измерений. Таким образом, метод разложения по динамическим модам позволяет проводить анализ системы на устойчивость по ее наблюдениям.



Спектр пространственных колебаний для различных моментов времени

В работе разложение по динамическим модам применялось для поиска характеристик мод неустойчивости в расчете дальнего вихревого следа за самолетом Boeing 747 в турбулентной атмосфере [2]. В качестве входных данных для метода DMD использовались координаты центров вихрей. Они определялись по локальному минимуму давления в равномерно распределенных сечениях. В каждый отдельный момент времени исследовалось развитие координат центров вихрей в направлении полета самолета.

По данным расчета с помощью метода разложения по динамическим модам был получен дискретный спектр пространственных колебаний. Он представлен на рисунке для одной из рассматриваемых расчетных областей. Из рисунка видно, что наиболее быстрорастущими колебаниями оказались колебания с длинами волн в диапазоне от 200 до 400 м. Обнаружены пространственные колебания, длины волн которых с течением времени становились равными длине расчетной области, деленной на целое число, что говорит о влиянии размеров расчетной области. Для амплитуд динамических мод, соответствующих некоторым длинам волн, наблюдается экспоненциальный закон роста, что качественно соответствует линейной теории неустойчивости дальнего вихревого следа [3].

Список литературы

1. Schmid P. J., Sesterhenn J. Dynamic mode decomposition of experimental data // 8th Int. Symp. Particle Image Velocimetry. Melbourne, Victoria, Australia, 2009.
2. Bosnyakov I. S., Gaifullin A. M., Sviridenko Yu. N. Aircraft wake vortex and neural model for training pilots for the encounter case // 55th 3AF Int. Conf. Appl. Aerodynamics. Poitiers, France, 2020.
3. Гайфуллин А. М. Вихревые течения. М.: Наука, 2015.

КИНЕТИКА ИЗМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ В НЕРЖАВЕЮЩИХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ И РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ*

В. А. Ключников, А. В. Гончар

*Институт проблем машиностроения РАН — филиал Института
прикладной физики РАН, 603024, Нижний Новгород*

Проведены исследования влияния изотермического одноосного растяжения нержавеющей хромоникелевой стали аустенитного класса 12Х18Н10Т на параметр акустической анизотропии и объемную долю фазы деформационного мартенсита при температурах 20, 40 и 60 °С. Параметр акустической анизотропии B , характеризующий изменение кристаллографической текстуры, рассчитывался по формуле:

$$B = 2(\tau_{zy} - \tau_{zx}) / (\tau_{zy} + \tau_{zx}), \quad (1)$$

где τ_{zx} , τ_{zy} — скорость и время распространения поперечных упругих волн, поляризованных вдоль и поперек оси растяжения соответственно. Изменение параметра акустической анизотропии ΔB рассчитывалось как разность текущего значения B и начального B ($\epsilon = 0$).

Объемная доля фазы деформационного мартенсита Φ определялась с помощью многофункционального вихретокового прибора МВП-2М.

На начальной стадии деформирования (от 0 до ~ 24 %) образование мартенсита протекает с малой интенсивностью (рис. 1, а), и на упругую анизотропию в основном влияет изменение кристаллографической текстуры аустенита. При этом ΔB уменьшается линейно (рис. 1, б).

На следующей стадии (от ~ 24 до ~ 42 %) при температурах деформирования 20 и 40 °С деформационный мартенсит образуется интенсивнее, чем при 60 °С, и, соответственно, в первом случае происходит заметное увеличение ΔB , тогда как во втором случае наблюдается его слабое монотонное уменьшение.

Общее изменение параметра B запишем в следующем виде:

$$\Delta B = \Delta B_A + \Delta B_M, \quad (2)$$

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 22-29-01237), <https://rscf.ru/project/22-29-01237/>

© В. А. Ключников, А. В. Гончар, 2023

где ΔB_A — составляющая ΔB , связанная с деформацией аустенита; ΔB_M — составляющая ΔB , связанная с мартенситным превращением.

На начальной стадии деформирования $\Delta B = \Delta B_A = -0,00086\epsilon$, где ϵ — значение пластической деформации в %.

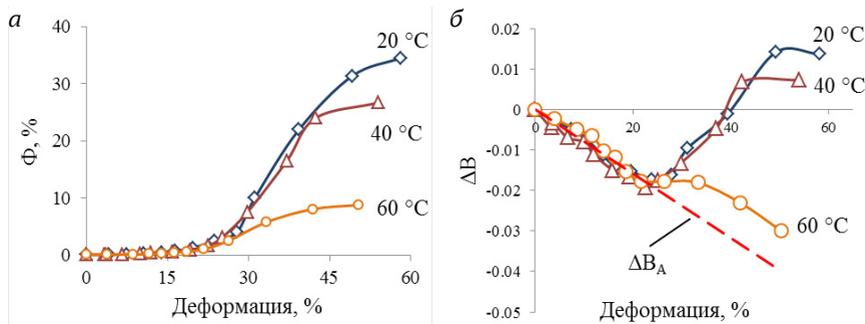


Рис. 1. Зависимость объемной доли деформационного мартенсита a и изменения параметра акустической анизотропии b от пластической деформации

Для следующей стадии деформирования можно записать:

$$\Delta B_M = \Delta B - 0,00086\epsilon. \quad (3)$$

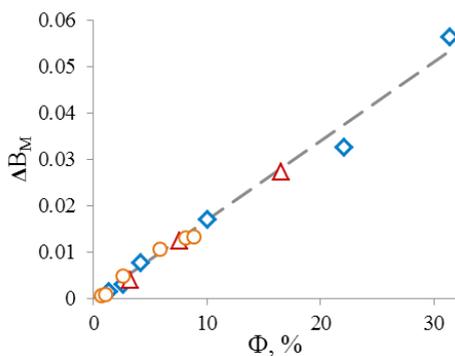


Рис. 2. Зависимость составляющей изменения параметра акустической анизотропии, связанной с мартенситным превращением, от объемной доли деформационного мартенсита

Получено, что ΔB_M зависит от Φ (в %) по линейному закону (рис. 2) и не зависит от температуры испытания в диапазоне от 20 до 60 °C:

$$\Delta B_M = 0,0017\Phi. \quad (4)$$

Таким образом, решая обратную задачу при известных значениях Φ и параметра акустической анизотропии B , можно рассчитать ΔB_M и найти составляющую ΔB_A , которая характеризует поврежденность материала и может использоваться для оценки фактического состояния.

ВЛИЯНИЕ РАДИУСА ПРИТУПЛЕНИЯ ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ НА ТЕЧЕНИЕ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ N-ВОЛНЫ*

В. Л. Кочарин, А. А. Яцких, А. Д. Косинов, Н. В. Семенов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Процесс ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковых пограничных слоях существенно зависит от уровня возмущения набегающего потока [1–3]. На течение в пограничном слое исследуемых моделей могут влиять квазистационарные возмущения в виде слабых скачков уплотнения, порождаемые неровностью поверхности на стенках рабочей части аэродинамической трубы [4–8]. После взаимодействия таких возмущений с передней кромкой исследуемой модели в пограничном слое обнаруживаются стационарные продольные возмущения. Изучение данного эффекта имеет как методическое значение для экспериментальных исследований ламинарно-турбулентного перехода, так и фундаментальное, так как относится к задаче восприимчивости пограничного слоя к возмущениям набегающего потока.

Анализ экспериментальных данных по генерации стационарных возмущений в пограничном слое падающими на переднюю кромку слабыми ударными волнами показал значительные отличия в картинах течения для случаев острой и притупленных передних кромок пластин. Однако эти эксперименты проводились при различных условиях (параметры генератора слабых ударных волн, набегающего потока и т. д.). Для изучения влияния передней кромки на возмущения, порождаемые в пограничном слое падающими слабыми ударными волнами, необходимы экспериментальные данные, полученные при одинаковых начальных условиях.

Представляемые исследования являются продолжением изучения данного эффекта и направлены на определение начальных полей пульсаций генерируемого возмущения в набегающем потоке и его воздействия на течение в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины в зависимости от радиуса притупления передней кромки.

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 22-19-00666), <https://rscf.ru/project/22-19-00666>.

Работа выполнена на базе ЦКП «Механика» ИТПМ СО РАН.

© В. Л. Кочарин, А. А. Яцких, А. Д. Косинов, Н. В. Семенов, 2023

Экспериментальные исследования выполнены в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН. Единичное число Рейнольдса набегающего потока составляло $Re_1 = (8 \pm 0,1) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, а число Маха $M = 2$. Измерения пульсаций массового расхода и среднего течения проводились с помощью термоанемометра постоянного сопротивления. В качестве генератора слабых ударных волн применялась двумерная наклейка на боковой стенке рабочей части трубы. Для измерений в пограничном слое использовались пластины с различным радиусом притупления передней кромки: $r \approx 0,05$; $r = 0,5$; $r = 2,5$ мм.

Получено, что в набегающем потоке за N-волной имеется протяженная область повышенного уровня пульсаций. Выполнен спектральный анализ в возмущенных областях. Представленные экспериментальные данные в пограничном слое пластин с различными радиусами притупления передней кромки показывают, что N-волна в набегающем потоке способна оказывать большее влияние на ламинарно-турбулентный переход на затупленной модели, чем в случае острой передней кромки.

Список литературы

1. Гапонов С. А., Маслов А. А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980. С. 134.
2. Laufer J. Aerodynamic noise in supersonic wind tunnels // *Aerospace Sci.* 1961. Vol. 28, № 9. P. 685–692.
3. Kendall J.M. Wind tunnel experiments relating to supersonic and hypersonic boundary-layer transition // *AIAA J.* 1975. Vol. 13, № 3. P. 290–299.
4. Кочарин В.Л., Яцких А.А., Косинов А.Д., Ермолаев Ю.Г., Семенов Н.В. Экспериментальное исследование воздействия волны сжатия на течение в сверхзвуковом пограничном слое при числе Маха 2,5 // *Сиб. физ. журн.* 2019. Т. 14, № 2. С. 46–55.
5. Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Кочарин В.Л., Семенов Н.В., Яцких А.А. Об экспериментальном исследовании воздействия слабых ударных волн на пограничный слой плоской притупленной пластины при числе Маха 2.5 // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* 2019. № 2. С. 112–118.
6. Kocharin V.L., Yatskikh A.A., Prishchepova D. S., Panina A. V., Yermolaev Yu. G., Kosinov A.D., Semionov N.V., Afanasev L. V. Experimental study of the impact of N-wave on heat transfer in a boundary layer of a flat plate at the Mach number 2 // *AIP Conf. Proc.* 2021. Vol. 2351, № 1. S.I. Art. 040036 (5 p.).
7. Kocharin V.L., Yatskikh A.A., Prishchepova D. S., Panina A. V., Yermolaev Yu. G., Kosinov A.D., Semionov N.V., Afanasev L. V. Experimental study of heat transfer in the boundary layer of a flat plate with the impact of weak shock waves on the leading edge // *AIP Conf. Proc.* 2020. Vol. 2288. S.I. Art. 030014 (4 p.).
8. Питеримова М.В., Косинов А.Д., Семенов Н.В., Яцких А.А., Кочарин В.Л., Ермолаев Ю.Г. Экспериментальное исследование влияния пары слабых ударных волн на ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2 // *Сиб. физ. журн.* 2022. Т. 17, № 2. С. 30–40.

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИОННОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА*

М. Г. Криницын, А. О. Афанасьев

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055,
Томск*

Проблема получения и формования современных материалов является актуальной. Создание искусственных материалов сегодня приводит к тому, что в руках человека оказываются материалы с необычными свойствами, в результате чего применение их в классических производственных технологиях затруднено или невозможно. К таким материалам относятся и МАХ-фазы, которые синтезируются искусственно и в природе не встречаются [1]. Керамические материалы на фундаментальном уровне являются перспективными материалами, но изготовление изделий из них на сегодняшний день затруднено в связи с их разложением при нагреве на более простые компоненты, не обладающие такими выдающимися свойствами.

На данный момент МАХ-фазы активно исследуются в составе композитов с TiC, интерметаллидами системы Ti-Al, различными металлами (медь, серебро и пр.), никелевыми сплавами, карбидом кремния, оксидом алюминия и другими [2–10].

В настоящей работе исследуются наполненные полимерные композиции с МАХ-фазой Ti_3AlC_2 и керамическими материалами (TiC, SiC). Применялось разное соотношение МАХ-фаза : керамика (30 : 70, 50 : 50, 70 : 30). Полученные полимер-керамические материалы были спрессованы методом холодного прессования, а также были использованы в технологии аддитивного формования объектов методом экструзии материала. Созданные образцы были спечены в вакууме при разной температуре, затем была исследована их структура и фазовый состав.

На спрессованных образцах было установлено, что МАХ-фаза частично сохраняется в большинстве образцов. В зависимости от соотношения МАХ-фаза : керамика формируется разная морфология и пористая структура об-

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 22-79-00086), <https://rscf.ru/project/22-79-00086/>

© М. Г. Криницын, А. О. Афанасьев, 2023

разцов. Из композитов также были изготовлены объемные образцы методом экструзии материала, их исследование запланировано в дальнейшем.



Внешний вид образцов, полученных методом экструзии полимер-керамических композиций

Список литературы

1. Barsoum M. W., El-Raghy T. The MAX phases: unique new carbide and nitride materials // *Am. Sci.* 2000. Vol. 89. P. 336–345.
2. Ruan M. et al. Microstructure and Mechanical Properties of TiC/Ti₃AlC₂ In-situ Composites Prepared by Hot Pressing Method // *Mater. Sci. Forum.* 2015. Vol. 816.
3. Akhlaghi M. et al. Spark plasma sintering of TiAl–Ti₃AlC₂ composite // *Ceramics Int.* 2018. Vol. 44, № 17. P. 21759–21764.
4. Ai T. et al. Low-temperature synthesis and characterization of Ti₂AlC/TiAl in situ composites via a reaction hot-pressing process in the Ti₃AlC₂–Ti–Al system // *Metals Mater. Int.* 2015. Vol. 21, № 1. P. 179–184.
5. Huang X. et al. Physical, mechanical, and ablation properties of Cu–Ti₃AlC₂ composites with various Ti₃AlC₂ contents // *Mater. Sci. Technol.* 2018. Vol. 34, № 6. P. 757–762.
6. Liu M. et al. Ag/Ti₃AlC₂ composites with high hardness, high strength and high conductivity // *Mater. Lett.* 2018. Vol. 213. P. 269–273.
7. Hu W. et al. Preparation and mechanical properties of TiC_x–Ni₃(Al, Ti)/Ni composites synthesized from Ni alloy and Ti₃AlC₂ powders // *Mater. Sci. Eng.: A.* 2017. Vol. 697. P. 48–54.
8. Hu W. et al. In-situ TiC and γ' -Ni₃(Al, Ti) triggered microstructural modification and strengthening of Ni matrix composite by reactive hot-press sintering pure Ni and Ti₂AlC precursor // *J. Alloys Compounds.* 2018. Vol. 747. P. 1043–1052.
9. Guo S. et al. SiC (SCS-6) fiber-reinforced Ti₃AlC₂ matrix composites: Interfacial characterization and mechanical behavior // *J. Eur. Ceramic Soc.* 2015. Vol. 35, № 5. P. 1375–1384.
10. Zhou W. et al. In situ synthesis, mechanical and cyclic oxidation properties of Ti₃AlC₂/Al₂O₃ composites // *Adv. Appl. Ceramics.* 2018. P. 1–7.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИНИЙ ОТРЫВА И ПРИСОЕДИНЕНИЯ В ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ*

С. А. Кузнецова¹, А. В. Бойко^{2,3}, К. В. Демьянко^{1,2},
Г. В. Засько^{1,2}, Ю. М. Нечепуренко^{1,2}

¹Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН, 125047, Москва

²Институт вычислительной математики
им. Г. И. Марчука РАН, 119333, Москва

³Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск

Определение областей отрыва и присоединения пограничного слоя имеет большое прикладное значение для аэродинамики. Отрыв потока от обтекаемых поверхностей летательных аппаратов может приводить к увеличению лобового сопротивления и, следовательно, к дополнительному расходу топлива. В связи с этим актуальны разработка автоматизированных методов идентификации линий отрыва и присоединения и их использование при обработке экспериментальных данных и/или результатов численного моделирования обтекания летательных аппаратов при их проектировании.

Авторами доклада был предложен численный алгоритм нахождения линий отрыва и присоединения трехмерного течения вязкой несжимаемой жидкости над плоской обтекаемой поверхностью. В основе алгоритма лежит анализ поля поверхностного трения и используется предложенный в работе математический критерий линий отрыва и присоединения [1]. В докладе обсуждаются численные эксперименты с этим алгоритмом, а также обобщение разработанной технологии на случай поверхностей малой кривизны и ее внедрение в программный комплекс LOTRAN 3, предназначенный для расчета положения ламинарно-турбулентного перехода в трехмерных пограничных слоях [2].

Список литературы

1. Surana A., Grunberg O., Haller G. Exact theory of three-dimensional flow separation. Part 1. Steady separation // J. Fluid Mech. 2006. Vol. 564. P. 57–103.
2. Boiko A. V., Demyanko K. V., Kirilovskiy S. V., Nечepуренко Yu. M., Poplavskaya T. V. Modeling of transonic transitional three-dimensional flows for aerodynamic applications // AIAA J. 2021. Vol. 59. № 9. P. 1–13.

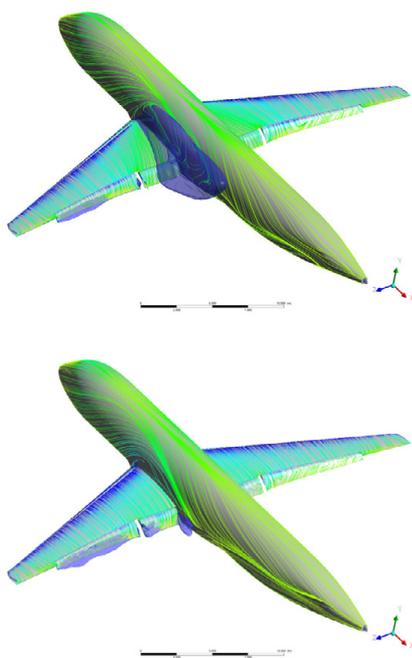
* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-71-10028).

© С. А. Кузнецова, А. В. Бойко, К. В. Демьянко, Г. В. Засько, Ю. М. Нечепуренко, 2023

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ МЕХАНИЗАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПАССАЖИРСКИХ САМОЛЕТОВ

В. Б. Курилов, Ю. Н. Бородина,
А. И. Сахарова, А. Ю. Слитинская

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Н. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)*



Обтекание компоновки регионального самолета с различными вариантами модификации механизации передней кромки крыла (синим цветом выделена область возвратного течения)

Возрастающая плотность воздушного движения, ужесточение экологических и других ограничений в зоне аэропортов накладывают серьезные требования к взлетно-посадочным характеристикам магистральных самолетов. Использование сложной многозвенной взлетно-посадочной механизации существенно утяжеляет самолет, делает его дороже в производстве и обслуживании и тем самым снижает его конкурентные преимущества.

В последние несколько десятков лет во всем мире наблюдается устойчивая тенденция по упрощению взлетно-посадочной механизации. В настоящее время повышение эффективности взлетно-посадочных устройств осуществляется за счет оптимизации их формы, взаимного положения и упрощения кинематики выдвижения.

В настоящей работе выполнен цикл расчетно-эксперимен-

тальных исследований по совершенствованию взлетно-посадочной механизации перспективных магистральных самолетов. Изучена возможность применения адаптивной механизации задней кромки, определены оптимальные сочетания углов отклонения закрылка и интерцептора. Исследованы способы улучшения механизации передней кромки крыла с естественной ламинаризацией обтекания для устранения отрыва в корне крыла на взлетно-посадочных режимах (см. рисунок).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ОТ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО ИСТОЧНИКА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ*

А. И. Кутепова, Д. В. Хотяновский, А. А. Сидоренко

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

На основе прямого численного моделирования были проведены исследования развития импульсных возмущений от локализованного источника тепла и физических механизмов ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковом пограничном слое на плоской пластине. Моделирование с разрешением вихревой структуры течения проводилось на основе численного решения нестационарных трехмерных уравнений Навье – Стокса с помощью программы NuCFS-R, разработанной в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН (ИТПМ СО РАН).

Расчетные параметры потока соответствовали реальным экспериментам, проводимым в ИТПМ СО РАН: число Маха потока $M = 1,45$, давление торможения $P_0 = 5,5 \cdot 10^4$ Па, температура торможения $T_0 = 290$ К, температура пластины $T_w = 290$ К. Основные параметры расчетов также соответствовали условиям проведенного ранее численного исследования с применением двух различных подходов: прямого численного моделирования и решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса [1]. В численном моделировании использовалась геометрия течения, определенная в результате проведенных подробных тестовых расчетов. Численная область представляла собой параллелепипед, нижняя грань которого совпадает с плоскостью пластины. Структурированная прямоугольная расчетная сетка сгущалась по нормальной координате в области пограничного слоя. Итоговое общее количество ячеек составило около 52 млн. Пограничный слой во входном сечении предполагался ламинарным и автомодельным. Тепловые возмущения возбуждались в виде прямоугольных периодических импульсов температуры пластины в области с размерами 3 мм в продольном и 2 мм в поперечном направлениях. Импульсы подавались на частоте 17 кГц со скважностью (рабочим циклом) $\frac{1}{2}$ и температурой импульса 315 К. Для изучения вопроса управления течением с помощью локального теплового воздействия решалась задача о взаимодействии пограничного

* Работа поддержана РФФ (№ 18-19-00547).

© А. И. Кутепова, Д. В. Хотяновский, А. А. Сидоренко, 2023

слоя с ударной волной. При этом на части верхней границы расчетной области, начиная с некоторого значения, задавались граничные условия, которые соответствуют параметрам за косым скачком.

Результаты моделирования показали, что возбуждаемые периодические возмущения температуры трансформируются в волны неустойчивости пограничного слоя, нарастающие в продольном направлении. Развитие этих растущих возмущений сопровождается формированием трехмерных продольных вихревых структур и приводит к возникновению ламинарно-турбулентного перехода (как показано на рисунке), проявляющегося в высокой степени хаотичности течения и существенных изменениях средних характеристик течения. В условиях взаимодействия пограничного слоя с падающей ударной волной наличие теплового источника позволило получить уменьшение отрывной области.



Изоповерхность Q -критерия

Список литературы

1. Polivanov P.A., Khotyanovsky D.V., Kutepova A.I. and Sidorenko A.A. Investigation of various approaches to the simulation of laminar-turbulent transition in compressible separated flows // J. Appl. Mech. Tech. Publ. 2020. Vol. 61, № 5. P. 717-726.

МОДЕЛИ РАЗНОЙ РАЗМЕРНОСТИ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСУДИСТОГО АНАСТОМОЗА*

Ю. О. Куянова, А. В. Дубовой, А. В. Бервицкий, Д. В. Паршин

*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Новосибирск*

Формирование обходных сосудистых анастомозов в настоящее время является широко используемым хирургами инструментом при лечении различных патологий церебральных сосудов таких, как церебральные аневризмы, стенозы и др. При лечении церебральных аневризм эта техника требуется в тех случаях, когда вместе с патологией хирург вынужден перекрыть жизненно важный для пациента сосуд. При этом к оставленному без большей части кровоснабжения участку сосудистой сети путем формирования анастомоза пришивается сосуд-донор. Однако данный вид хирургического вмешательства несет определенные риски, в частности формирование вихрей и застойных зон, что может привести к тромбообразованию в просвете сосуда.

В настоящее время хирурги проводят данный тип операции, исходя из личного опыта, однако есть несколько параметров, которые можно оптимизировать, что позволит снизить послеоперационные риски. Ранее мы рассмотрели задачу оптимального угла формирования анастомоза с точки зрения гемодинамических характеристик, но параметры подбирались вручную, что существенно сокращало область поиска, а также увеличивало его время [1]. В данной работе для оптимизации формирования сосудистых анастомозов, в частности для поиска оптимального места соединения двух сосудов, используется метод роя частиц [2]. В качестве целевой функции, значение которой должно быть минимизировано, была выбрана разница давлений на выходе из сосуда-донора до и после формирования анастомоза [3]. Давление определяется на основе использования 1D- и 0D-гемодинамики. Было выполнено сравнение применения двух различных моделей при определении оптимального места соединения сосудов. Кроме того, рассмотрены два реальных случая проведения операций с формированием анастомоза со схожим расположением патологии. По данным этих кейсов, полученных

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 20-71-10034).
© Ю. О. Куянова, А. В. Дубовой, А. В. Бервицкий, Д. В. Паршин, 2023

из расчетов в пакет ANSYS, было выполнено сравнение с результатами оптимизации.

Список литературы

1. Kuyanovа Iu. O., Presnyakov S. S., Dubovoy A. V., Chupakhin A. P., Parshin D. V. Numerical study of the tee hydrodynamics in the model problem of optimizing the low-flow vascular bypass angle // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2019. Vol. 60. P. 1038–1045.
2. Poli R., Kennedy J., Blackwell T. Particle swarm optimization // Swarm Intelligence. 2007. Vol. 1, № 1. P. 33–57.
3. Куянова Ю. О., Дубовой А. В., Бервицкий А. В., Паршин Д. В. Численная оптимизация геометрических характеристик сосудистого анастомоза с использованием методов роевого интеллекта в задачах нейрохирургии // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63, № 4 (374). С. 64–72.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ С ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ*

С. А. Лаврук

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

Работа направлена на исследование процесса взаимодействия детонационной волны с препятствиями разной проницаемости, что является фундаментальной задачей. Эта задача актуальна с точки зрения уменьшения разрушительных техногенных катастроф и при исследовании процесса перехода дефлаграционного горения в детонацию.

Рассматривается задача о взаимодействии гетерогенной детонации с пористой вставкой конечного размера, перекрывающей всю ширину канала. Ранее в [1, 2] исследовалась задача о взаимодействии гетерогенной детонационной волны с пористой вставкой полубесконечной длины. В ходе численного моделирования пористая вставка моделировалась не явно, т. е. в области, заполненной пористым элементом, решалось дополнительное уравнение, учитывающее взаимодействие элементов пористой вставки с гетерогенной детонационной волной.

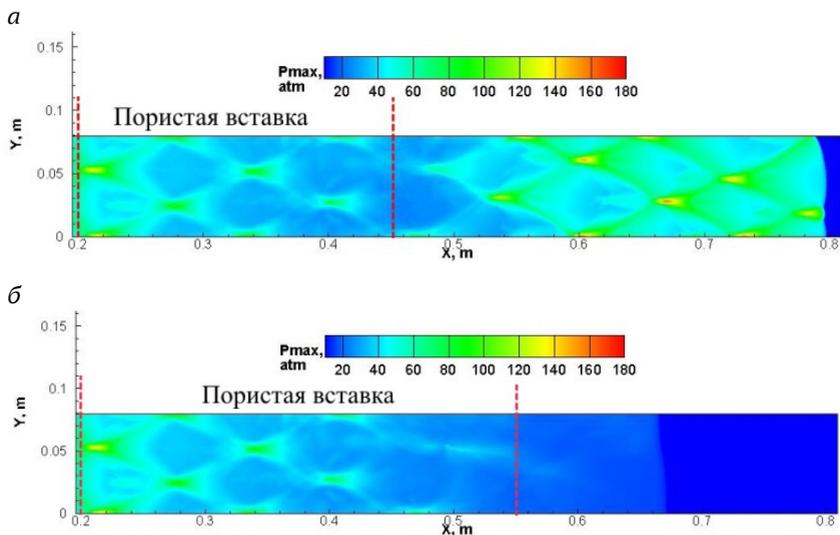
В качестве численной модели использовалась модель механики многофазных сред. Система уравнений состоит из уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии для каждой из фаз (газ, горючие частицы и пористый элемент), замыкается уравнениями состояния и соотношениями для процессов массообмена между компонентами, обмена импульсами и теплообмена между газом и твердыми фазами (горючими частицами и инертной средой) [1, 2].

Для горючих частиц диаметром 3,5 мкм и пористого фильтра с параметрами: диаметр элементов пористой вставки 50 мкм, объемная концентрация инертной фазы $m_3 = 8 \cdot 10^{-4}$ — получены результаты, представленные на рисунке (пунктирными линиями очерчено положение пористой вставки в расчетной области). Видно, что при увеличении длины пористой вставки с 25 до 35 см происходит срыв детонации. При длине облака 25 см происходит локальное ослабление детонации (см. рисунок, *a*) с последующим

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 21-79-10083), <https://rscf.ru/project/21-79-10083>.

© С. А. Лаврук, 2023

восстановлением как скорости лидирующего фронта, так и ячеистой структуры и давления в тройных точках. На рисунке, б представлены результаты для срыва детонационной волны, ширина пористого элемента составила 35 см. Видно, что при срыве детонации происходит выравнивание лидирующего фронта, а давление за лидирующим фронтом не превышает 30 атм.



Поля истории максимального давления
 для $d_2 = 3,5$ мкм, $d_3 = 50$ мкм, $m_3 = 8 \cdot 10^{-4}$: а — $L = 25$ см; б — $L = 30$ см

В ходе исследований при варьировании диаметра горючих частиц и размера включений в пористом элементе максимальная длина пористой вставки не превышала 50 см. Все закономерности, связанные с изменением размера горючих частиц и полученные для полубесконечной пористой вставки, сохранились.

Список литературы

1. Lavruk S., Tropin D. Investigation of Heterogeneous Detonation Wave Interaction with Porous Medium // Combust. Sci. Technol. 2023. (в печати).
2. Lavruk S.A., Tropin D.A. Simulation of heterogeneous detonation interaction with porous insert // Combust. Explosion. 2022. Vol. 15, № 3. P. 63–70.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЯ САМОЛЕТА В ОКРЕСТНОСТИ КРИТИЧЕСКИХ УГЛОВ АТАКИ*

Л. К. Левченко, М. А. Акимов

*Новосибирский государственный
технический университет, 630073, Новосибирск
Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Малоразмерные беспилотные летательный аппараты (мБПЛА) применяются на небольших высотах, где характерно воздействие значительных внешних возмущений, выводящее аппарат на большие углы атаки. В работе объектом исследования являются динамические характеристики мБПЛА самолетного типа, который в результате внешних возмущений оказывается на околочритических углах атаки, в области нелинейных аэродинамических характеристик.

Для построения кривых $c_{ya}(\alpha)$, $c_{ya}(c_{xa})$ и $m_{za}(c_{ya})$ вводим аппроксимирующую функцию, состоящую из линейного и двух нелинейных участков: докритического и закритического.

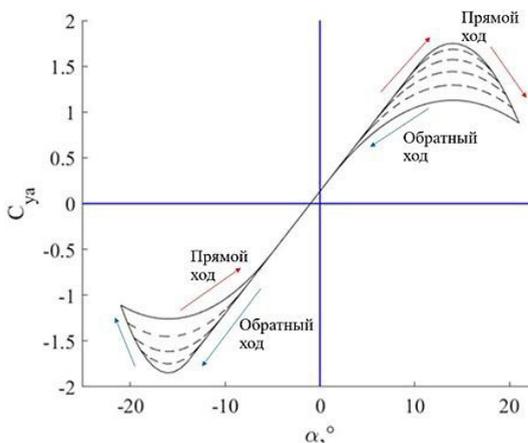
$$y = \begin{cases} \frac{dy}{dx} \cdot (x - x_0), & x_0 \leq x \leq x_{\text{нн}}, \\ \frac{dy/dx}{x_{\text{нн}} - x_{\text{кр}}} \cdot \left[\frac{x^2 - x_{\text{кр}}^2}{2} - x_{\text{кр}}(x - x_{\text{кр}}) \right] + y_{\text{max}}, & x_{\text{нн}} < x \leq x_{\text{кр}}, \\ \frac{dy/dx}{x_{\text{нн}} - x_{\text{кр}}} \cdot \left[\frac{x^2 - x_{\text{кр}}^2}{2} - x_{\text{кр}}(x - x_{\text{кр}}) \right] \cdot k + y_{\text{max}}, & x \geq x_{\text{кр}}, \end{cases}$$

где $x_{\text{нн}} = 2 \left[\frac{y_{\text{max}}}{dy/dx} + x_0 \right] - x_{\text{нн}}$ — абсцисса начала нелинейности; k — свободный коэффициент, определяющий поведение кривой после критическо-

* Исследования поддержаны грантом РФФ (№ 20-49-08006) «Исследование нестационарных эффектов при отрыве потока на БПЛА» 2020–2022 гг.

© Л. К. Левченко, М. А. Акимов, 2023

го угла атаки. Приблизительные значения параметров математической модели подбираются по данным из литературы [1, 2]. Для построения гистерезиса вводим дополнительные значения: $c_{ya \max \text{ гист}}$ для обратного хода по углу атаки и α_{max} , учитывающий, насколько был превышен критический угол атаки $\alpha_{\text{крит}}$. Получаем строго определенное семейство кривых, моделирующих петли гистерезиса разного размера (см. рисунок). Характерные значения выбирались по публикациям [3–5].



Модель, описывающая стационарную зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки с петлями гистерезиса

В работе были выполнены сравнения динамики возмущенного движения мБПЛА без и с учетом явления гистерезиса. В расчете, не учитывающем гистерезис, при уменьшении угла атаки кривая проходит через $c_{ya \max}$. При его учете амплитуда по c_{ya} уменьшается.

Учет гистерезиса в данной постановке не повлиял значительно на характеристики возмущенного движения: амплитуды колебаний и количество периодов до затухания существенно не изменились. Однако учет данного явления позволяет расширить задачу о возмущенном движении самолета.

Список литературы

1. Аэродинамика и динамика полета магистральных самолетов / под ред. акад. РАН Г. С. Бюшгенса. М.: Изд. отдел ЦАГИ; Пекин: АВИА — Изд-во КНР, 1995. 772 с.
2. Михайлов Ю. С. Анализ взаимодействия воздушных винтов с планером легкого транспортного самолета // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2021. Т. 24, № 05. С. 76–88.

3. Колин И. В., Марков В. Г., Трифонова Т. И., Шуховцов Д. В. Гистерезис в статических аэродинамических характеристиках крыла с несимметричным профилем // Журн. техн. физики. 2004. Т. 74, вып. 2.

4. Кузьмин П. В., Мелешин Б. А., Шелюхин Ю. Ф., Шуховцов Д. В. Инженерная модель нестационарных продольных аэродинамических характеристик на больших углах атаки // Уч. зап. ЦАГИ. 2015.

5. Жук А. Н., Колькино К. А., Храбров А. Н. Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик модели при динамических выводах на сверхбольшие углы атаки // Уч. зап. ЦАГИ. 2004.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ТЕОРИИ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ И РАСЧЕТА ДОБЫЧИ НЕФТИ*

Д. Ю. Легостаев, В. П. Косяков

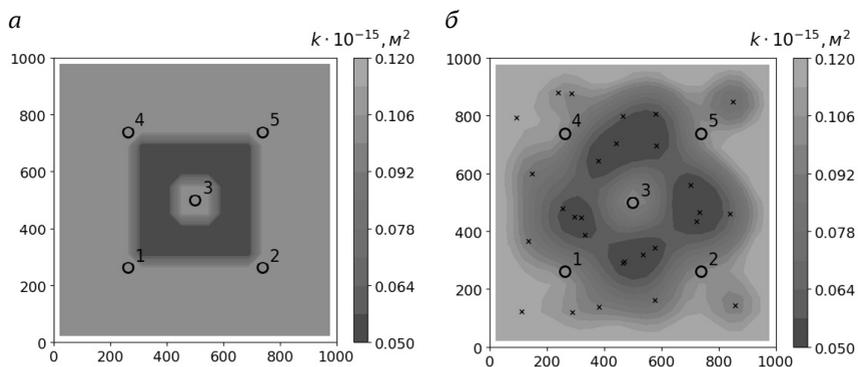
Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 625026, Тюмень

Один из основных источников информации для принятия решений при разработке нефтяных месторождений — результаты математического моделирования. При этом традиционным подходом является использование геолого-гидродинамических моделей, предполагающих прямое численное моделирование процессов многофазной фильтрации на основе геологических моделей месторождений. К слабым сторонам такого подхода можно отнести его высокую трудозатратность и зачастую несопоставимость сложности моделей с качеством и точностью исходной информации. В связи с этим в последнее время широкое распространение получили подходы прокси-моделирования, которые заключаются в применении упрощенных моделей, использующих ограниченный набор наиболее важных данных. Подобные модели могут быть как физически содержательными: CRM, линии тока, характеристики вытеснения, — так и чисто математическими или статистическими: нейросети, деревья решений [1, 2].

В настоящей работе для решения обратной задачи восстановления поля проницаемости нефтяного пласта применена модель, использующая элементы машинного обучения и физически содержательную модель фильтрации [3]. Для моделирования фильтрационных потоков применена однофазная модель фильтрации слабосжимаемой жидкости. Для параметризации фильтрационной модели использована сеть радиально базисных функций, служащая для определения проницаемости в межскважинном пространстве. Тестирование разработанного алгоритма проведено на примере зонально неоднородного поля проницаемости. Для всех исследованных вариантов зональной неоднородности было получено качественное совпадение восстановленных карт проницаемости с исходными (см. рисунок). При этом отклонение расчетных данных от фактических не превышало 1 % для проницаемости и 5 % для давления во всех рассмотренных примерах.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области в рамках научного проекта № 20-41-720004.

© Д. Ю. Легостаев, В. П. Косяков, 2023



Карта исходного (а) и восстановленного (б) поля проницаемости для неоднородности типа «кольцо»

Одним из ключевых показателей разработки месторождения является объем добытой нефти. Распространенным подходом для оценки объемов добычи нефти являются характеристики вытеснения [2]. Альтернативным инструментом для прогнозирования добычи нефти могут выступать рекуррентные нейронные сети, получившие широкое применение для прогнозирования временных рядов [1]. Применение нейросетевого подхода позволяет привлекать большой объем информации для выявления ключевых закономерностей, влияющих на процессы извлечения нефти. Использование однофазной модели фильтрации совместно с нейросетевой моделью для прогнозирования добычи нефти образует гибридную модель, которая может быть задействована в оперативном управлении разработкой нефтяных месторождений.

Список литературы

1. Gopa K., Yamov, S., Naugolnov, M., Perets, D., Simonov M. Cognitive Analytical System Based on Data-Driven Approach for Mature Reservoir Management // SPE Rus. Petroleum Technol. Conf. M., 2018.
2. Kong B., Chen Sh., Chen Z., Zhou Q. Bayesian probabilistic dual-flow-regime decline curve analysis for complex production profile evaluation // J. Petroleum Sci. Eng. 2020. Vol. 195. P. 107623.
3. Косяков В.П., Легостаев Д.Ю. Использование машинного обучения для восстановления поля проницаемости элемента разработки нефтяного пласта в двумерной постановке // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Т. 8, № 2 (30). С. 129-149.

МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ СИСТЕМ Mg-Zn-Ca И Mg-Zn-Y МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ*

М. Л. Линдеров, Д. Л. Мерсон

*Научно-исследовательский институт прогрессивных технологий,
Тольяттинский государственный университет, 445020, Тольятти*

Совершенствование существующих и разработка новых материалов является неотъемлемым трендом для любой промышленности в борьбе за ее конкурентоспособность. Так, в мировой хирургической практике наметилась тенденция на использование временных имплантатов из материалов, способных растворяться в человеческом организме, не нанося ему вреда. Тем самым появляется возможность избежать повторной операции по удалению имплантата после завершения всех процедур заживления, что, очевидно, значительно снижает травмирующее воздействие на человека. В качестве подобных материалов сейчас рассматриваются магний и его сплавы. Однако большинство ранее разработанных магниевых сплавов были технического назначения и оказались не подходящими для использования в медицине, так как содержат в себе в качестве легирующего элемента алюминий, который является токсичным для человеческого организма. Сплавы же системы Mg-Zn-Zr (например, MA14), на которые возлагали большие надежды, так как они не содержат токсичные элементы и имеют очень хороший комплекс физико-механических свойств, показали невысокие характеристики при коррозионно-усталостном разрушении и коррозии под напряжением, а главное, получили средний бал по цитотоксичности и другим медицинским тестам. В связи с этим стали разрабатываться новые классы магниевых сплавов, которые, с одной стороны, не содержали бы в себе легирующих элементов, вредных для человеческого организма, а с другой, обладали достаточными механическими свойствами, чтобы выдерживать нагрузки в течение всего времени реабилитации. Сейчас можно выделить две группы сплавов: системы Mg-Zn-Ca и Mg-Zn-Y, которые обладают хорошим сочетанием физико-механических и коррозионных свойств и являются перспективными для применения в медицине.

Система Mg-Zn-Ca

На данную систему возлагают особые надежды, так как все элементы, входящие в нее, являются нетоксичными по отношению к человеческому

* Работа выполнена в рамках государственного задания FEMR-2021-0011.

© М. Л. Линдеров, Д. Л. Мерсон, 2023

организму. Кроме того, использование многоступенчатой термомеханической обработки (ТМО) позволяет поднять прочностные, а главное, усталостные свойства до приемлемого уровня при небольшом легировании, например, для сплава Mg-1Zn-0,2Ca на воздухе был достигнут предел выносливости порядка 105 МПа, а для Mg-4Zn-0,1Ca — порядка 120 МПа [1,2]. Кроме того, данные сплавы демонстрируют высокую коррозионную стойкость в биологически активной среде, например, сплав Mg-1Zn-0,2Ca после ТМО, наряду с высокими механическими свойствами, имеет низкую скорость коррозии 1,3 мм/год [3].

Система Mg-Zn-Y

Данная система легирования хороша тем, что за счет добавления иттрия есть возможность повысить механические свойства. Так, предел выносливости для сплава Mg-4Zn-7Y значительно выше, чем для системы Mg-Zn-Ca, и достигает уровня 160 МПа [4]. Однако влияние иттрия на человеческий организм, особенно его предельно допустимые концентрации, до конца еще не изучены, что является определенным сдерживающим фактором для данной группы сплавов [5].

Список литературы

1. Jafari S., Raman R. K. S., Davies C. H. J., Hofstetter J., Uggowitzer P. J., Löffler J. F. Stress Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue Characterisation of MgZn1Ca0.3 (ZX10) in a Simulated Physiological Environment // J. Mech. Behavior Biomed. Mater. 2017. Vol. 65. P. 634-643.
2. Vinogradov A., Vasilev E., Kopylov V., Linderov M., Brilevesky A., Merson D. High Performance Fine-Grained Biodegradable Mg-Zn-Ca Alloys Processed by Severe Plastic Deformation // Metals (Basel). 2019. Vol. 9.
3. Merson D., Brilevsky A., Myagkikh P., Markushev M., Vinogradov A. Effect of Deformation Processing of the Dilute Mg-1Zn-0.2Ca Alloy on the Mechanical Properties and Corrosion Rate in a Simulated Body Fluid // Lett. Mater. 2020. Vol. 10. P. 217-222.
4. Briffod F., Ito S., Shiraiwa T., Enoki M. Effect of long period stacking ordered phase on the fatigue properties of extruded Mg-Y-Zn alloys // Int. J. Fatigue. 2019. Vol. 128.
5. Барашков В. А. и др. Химические элементы в организме человека. Справочные материалы. Архангельск: Изд. центр ПГУ. 2001. 45 с.

ПРЯМОЕ СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕПОЛНОЙ АККОМОДАЦИИ ЭНЕРГИИ РЕКОМБИНАЦИИ

А. С. Литвинцев, А. Н. Молчанова, Е. А. Бондарь

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Поверхностные реакции играют существенную роль в переносе тепла на поверхность спускаемого аппарата, входящего в атмосферу. Поскольку эти реакции являются экзотермическими, отсутствие модели их учета в расчетах обтекания спускаемого аппарата может привести к существенному занижению значения теплового потока на его поверхность, а также неправильно предсказать состав газа вблизи поверхности и момент тангажа аппарата [1]. Таким образом, правильно разработанная каталитическая модель позволяет повысить точность расчета аэротермодинамики спускаемого аппарата, что имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение.

При моделировании течения вокруг спускаемого аппарата на больших высотах (выше 80 км) из-за разреженности течения невозможно использовать сплошносредные модели течения. Основным инструментом численного исследования в таком случае становится метод прямого статистического моделирования (ПСМ) [2]. В предыдущих работах был представлен подход для детального моделирования процессов поверхностного катализа с использованием информации о вероятностях и временах процессов для конкретных молекул [3–5]. При этом в упомянутых работах предполагалась полная аккомодация энергии рекомбинации. Однако энергия, выделяющаяся в ходе реакций рекомбинации, может не полностью переходить к поверхности, а частично переноситься продуктами реакции в газовую фазу, что может оказывать влияние на параметры течения в пристеночной области и тепловой поток к стенке.

Для описания доли энергии рекомбинации, которая поглощается поверхностью, используется коэффициент аккомодации энергии рекомбинации β . Стоит отметить, что в экспериментальных работах по измерению каталитической активности материалов авторы зачастую определяют не истинное значение вероятности рекомбинации γ , а приведенное $\gamma^* = \gamma\beta$. С другой

стороны, при получении данных о каталитической активности поверхности методом квазиклассических траекторий можно отдельно получить значения γ и β . Эти данные могут быть использованы в расчетах методом ПСМ.

В настоящей работе проведена модификация модели поверхностных реакций для метода ПМС для учета неполной аккомодации энергии рекомбинации [3]. В докладе будут представлены результаты исследования влияния коэффициента аккомодации энергии поверхностной рекомбинации на параметры течения в пристеночной области и тепловой поток к поверхности в переходном по числу Кнудсена режиме течения с использованием метода ПСМ.

Список литературы

1. Kovalev V. L., Kolesnikov A. F. Experimental and theoretical simulation of heterogeneous catalysis in aerothermochemistry // *Fluid Dynamics*. 2005. Vol. 40, № 5. P. 669–693.
2. Bird G. A. *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*. Clarendon Press, Oxford, 1994.
3. Molchanova A. N., Kashkovsky A. V., Bondar Ye. A. Surface recombination in the direct simulation Monte Carlo method // *Phys. Fluids*. 2018. Vol. 30, № 10. P. 107105 (18).
4. Litvintsev A. S., Molchanova A. N., Bondar Ye. A. NO production on the reentry spacecraft thermal protection system surface in the direct simulation Monte Carlo method // *J. Phys.: Conf. Series: XVI All-Russian Seminar Int. Participation Dynamics Multiphase Media*. 2019. Vol. 1404. P. 012118 (6).
5. Litvintsev A. S., Molchanova A. N., Bondar Ye. A. Effects of heterogeneous NO production on the aerothermodynamics of high-altitude re-entry // *AIP Conf. Proc.: XX-VII Conf. High-Energy Processes Condensed Matter*. 2020. Vol. 2288. P. 030090 (6).

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ФРОНТА ВОЛНЫ*

А. И. Лопато

Институт автоматизации проектирования РАН, 123056, Москва

Распространение волн детонации в неоднородных газовых смесях является достаточно актуальной проблемой. Примером могут служить задачи, связанные с распространением и подавлением волн детонации в тоннелях и шахтах. В этом случае взрывоопасная смесь может быть распределена по пространству неравномерным образом. Другим примером являются исследования, связанные с разработкой импульсных детонационных двигателей, основанных на непрерывной вращающейся детонации. В таких двигателях неоднородность смеси может возникать при подаче окислителя и топлива в установку в область перед фронтом детонационной волны.

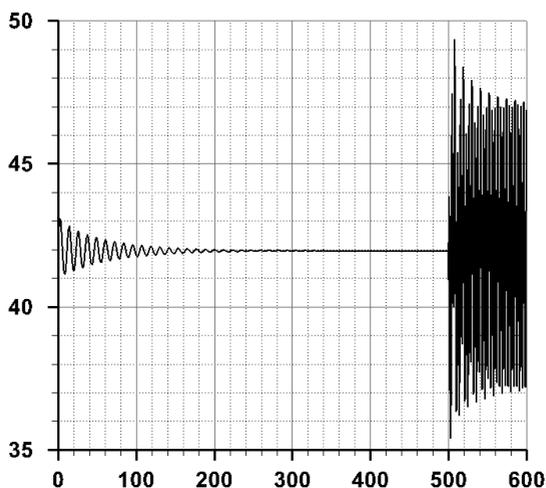
В последние несколько лет наблюдается рост работ, в которых проводится численное исследование задач, связанных с распространением детонационных волн в каналах с неравномерным распределением газодинамических параметров смеси. Так, в работах, отмеченных в [1], проводятся исследования модельных постановок, при рассмотрении которых проясняются механизмы распространения детонации в неоднородных средах с продольным и поперечным градиентом концентрации топлива, с переменной плотностью смеси, с наличием областей инертного газа и др.

В данной работе рассматривается распространение детонационной волны в неоднородной плотностью в системе координат фронта лидирующей ударной волны (ЛУВ). Математическая модель основана на системе уравнений Эйлера, дополненной одностадийной моделью кинетики Аррениуса и записанной в системе координат лидирующей волны. Система записывается в безразмерном виде [2]. При переходе в систему координат ЛУВ в уравнениях возникает новая величина — скорость лидирующей волны. Значение скорости определяется в ходе решения системы нелинейных уравнений.

Определяющая система уравнений решается на фиксированном отрезке $[-H; 0]$, $H = 20,0$. Правая граница соответствует фронту ЛУВ. Длина

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-71-00113).
© А. И. Лопато, 2023

H выбиралась достаточно большой, чтобы в рассматриваемой задаче левая граница не влияла на динамику движения фронта ЛУВ. Энергия активации смеси имеет значение $E = 25$. Значения остальных физико-химических параметров газовой смеси приведены в [2]. Распределение параметров смеси по пространству в начальный момент времени отвечает решению стационарной задачи Зельдовича — Неймана — Деринга. После момента времени $t = 500,0$ плотность перед фронтом ЛУВ меняется по синусоидальному закону. До этого момента времени наблюдается выход детонации на самоподдерживающийся режим Чепмена — Жуге, как видно из рисунка. После момента $t = 500,0$ происходит выход на слабонеустойчивый режим детонации. Проводится характеристический анализ поля течения за фронтом ЛУВ.



Зависимость давления за фронтом ЛУВ от времени для энергии активации смеси $E = 25$ и физико-химических параметров смеси из [2]

Список литературы

1. Порошина Я. Э., Лопато А. И., Уткин П. С. Характеристический анализ динамики распространения ударной волны в среде с неравномерным распределением плотности // Хим. физика. 2022. Т. 41, № 8. С. 48–58.
2. Lopato A. I., Utkin P. S. Toward Second-Order Algorithm for the Pulsating Detonation Wave Modeling in the Shock-Attached Frame // Combust. Sci. Technol. 2016. Vol. 188. P. 1844–1856.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА PSP ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТРАНСЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ*

Н. К. Лузгин, А. Д. Будовский, А. А. Сидоренко

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

В данной работе представлены результаты исследований структуры течения в прямоугольном канале при взаимодействии пограничных слоев стенки рабочей части аэродинамической трубы и экспериментальной модели в области их углового сопряжения в условиях трансзвукового набегающего потока. Исследовалась применимость метода PSP[1] в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН.

Эксперименты выполнены в сверхзвуковой аэродинамической трубе с использованием сопловых вставок, обеспечивающих трансзвуковой набегающий поток с числом Маха = 0,75 и образующих канал прямоугольного сечения. На боковой стенке канала располагалась модель в виде профилированного выступа. Профиль модели спроектирован так, чтобы над ней возникала локальная сверхзвуковая зона, замыкающаяся скачком уплотнения.

Установлено, что форма фронта скачка на поверхности модели имеет вид, близкий к прямолинейному. Зоны интерференции пограничного слоя, развивающегося на стенках рабочей части трубы и на поверхности экспериментальной модели в местах их сопряжения, не оказывают заметного влияния на течение в целом (рис. 1).

Для данной экспериментальной конфигурации были выполнены численные эксперименты с помощью пакета ANSYS Fluent. Получено, что в местах сопряжения модели со стенками рабочей части трубы в области с неблагоприятным градиентом давления существует взаимодействие набегающего пограничного слоя на стенках рабочей части трубы и пограничного слоя на поверхности модели (см. рис. 1). Это приводит к тому, что форма подножия трансзвукового скачка становится дугообразной, что не согласуется с экспериментальными данными PSP.

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 годы (проект № 121030500162-7). Эксперименты проводились на оборудовании Центра коллективного пользования «Механика» (ИТПМ СО РАН).

© Н. К. Лузгин, А. Д. Будовский, А. А. Сидоренко, 2023

Для верификации данных были проведены вспомогательные эксперименты, в которых было получено распределение температуры по поверхности модели с помощью метода тепловизионных измерений и проведена визуализация поверхностного течения с помощью метода «сажа-масло».

Исследование показало, что результаты тепловизионных измерений и поверхностной визуализации согласуются между собой. На рис. 2 видно, что в зоне сопряжения поверхности модели и стенки рабочей части аэродинамической трубы присутствует эффект интерференции пограничных слоев, что не согласуется с результатами PSP-измерений. Эффект во вспомогательных экспериментах менее выражен, чем при численном моделировании. Тем не менее количественные данные о структуре течения и положении трансзвукового скачка уплотнения хорошо согласуются между собой во всех случаях.

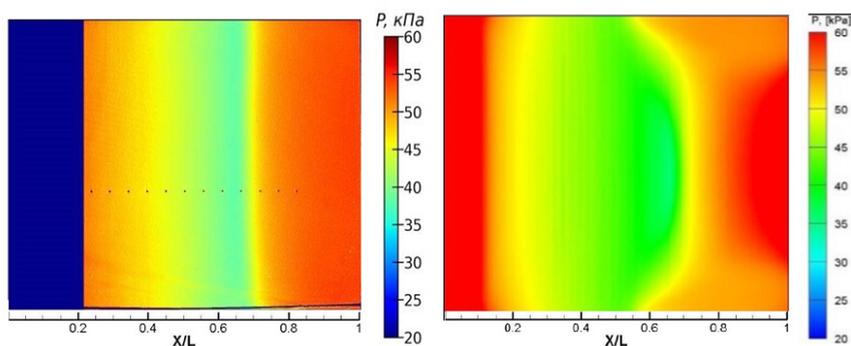


Рис. 1. Поле давления на поверхности модели, измеренного PSP и CFD

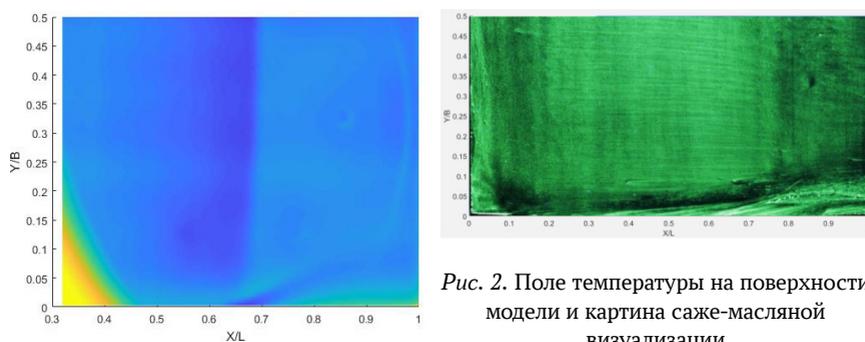


Рис. 2. Поле температуры на поверхности модели и картина саже-масляной визуализации

Список литературы

1. Liu T., Sullivan J.P. Pressure and temperature sensitive paints. Springer Berlin, Heidelberg, 2005.
2. Мошаров В. Е., Орлов А. А., Радченко В. Н. Технология люминесцентных преобразователей давления и температуры в экспериментальной аэродинамике // Датчики и системы. 2004. № 3. С. 19–21.

МГНОВЕННЫЙ ЛОКАЛЬНЫЙ ОТРЫВ ПОТОКА ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ПАРАМЕТРА КЛАУЗЕРА *

А. А. Лукьянов, С. А. Пантелеев, Д. И. Зарипов

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

Мгновенный локальный отрыв потока (МЛОП) характеризуется отрицательным мгновенным значением продольной составляющей вектора касательного напряжения на стенке. Механизм возникновения МЛОП и его статистические характеристики сильно зависят от параметра Клаузера $\beta = (\delta^*/\tau_w)(dp/dx)$, где δ^* — толщина вытеснения, τ_w — среднее касательное напряжение на стенке, dp/dx — продольный градиент статического давления. В работе [1] было исследовано влияние положительных значений параметра Клаузера на статистические характеристики явления МЛОП. Было обнаружено, что с увеличением β в турбулентном пограничном слое (ТПС) вероятность возникновения МЛОП существенно возрастает. Однако до сих пор вопрос о его существовании при отрицательных значениях параметра Клаузера остается открытым и требует дальнейшего исследования.

В данной работе рассматривается турбулентное течение воздуха в дозвуковом диффузоре и конфузоре при числе Рейнольдса $Re = U_b H/\nu = 6200$, где U_b — среднерасходная скорость на входе в рабочий участок, ν — кинематическая вязкость, H — полуширина канала. Канал длиной 6 м состоял из предвключенного участка длиной 3,6 м с постоянным поперечным сечением ($0,1 \times 0,1 \text{ м}^2$), рабочего участка длиной 1,2 м с переменной площадью поперечного сечения и выходного участка. Входное сечение рабочего участка оставалось неизменным, а выходное варьировалось: $0,1 \times 0,12 \text{ м}^2$ ($\beta = -0,17$, $Re_\tau = 367$), $0,1 \times 0,1 \text{ м}^2$ ($\beta = -0,28$, $Re_\tau = 357$), $0,1 \times 0,08 \text{ м}^2$ ($\beta = -0,38$, $Re_\tau = 328$), где β и динамическое число Рейнольдса Re_τ определены на расстоянии 1 м от входа в рабочий участок.

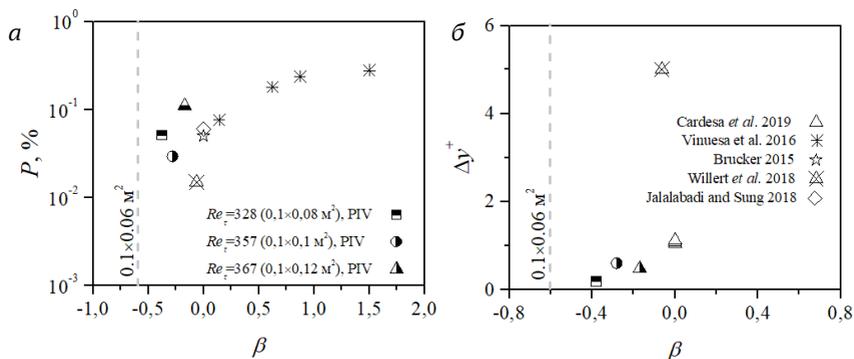
Исследование процессов, протекающих в пристенной области ТПС, проводилось экспериментально (методом PIV) с высоким пространственно-временным разрешением. Алгоритм обработки полученных PIV-изображений и метод фильтрации осциллограмм скорости подробно описаны в работе [2]. Процедура регистрации событий МЛОП представлена в работе [3]. Всего

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 22-29-01274).

© А. А. Лукьянов, С. А. Пантелеев, Д. И. Зарипов, 2023

было зарегистрировано 41 ($0,1 \times 0,12 \text{ м}^2$), 27 ($0,1 \times 0,1 \text{ м}^2$) и 17 ($0,1 \times 0,08 \text{ м}^2$) независимых событий МЛОП.

На рисунке показано, что вероятность и высота области МЛОП, полученные для канала постоянного поперечного сечения, хорошо согласуются с численными и экспериментальными результатами других исследований. Гораздо более высокая вероятность у стенки, показанная на рисунке (а) для конфузора, объясняется недостаточным количеством узлов расчетной сетки на область МЛОП. Результаты, представленные на рисунке (б), демонстрируют уменьшение средней высоты области МЛОП при уменьшении параметра Клаузера. Это означает, что дальнейшие исследования при более низких значениях параметра Клаузера следует проводить с более высоким пространственным разрешением. Анализ условно осредненных осциллограмм скорости в пристенной области ТПС показал общность механизма их возникновения в рассматриваемых конфигурациях.



Некоторые статистические характеристики МЛОП: *a* — вероятность обратного течения на стенке, оцененная как отношение времени, в течение которого наблюдается отрицательная продольная скорость, к общему времени наблюдения; *б* — средняя высота области обратного течения

Список литературы

1. Vinuesa R., Örlü R., Schlatter P. Characterization of backflow events over a wing section // *J. Turbul.* 2017. Vol. 18, № 2. P. 170–185.
2. Zaripov D.I., Li R., Dushin N.S. Dissipation rate estimation in the turbulent boundary layer using high-speed planar Particle Image Velocimetry // *Exp. Fluids.* 2019. Vol. 60, № 1. P. 16.
3. Zaripov D., Ivashchenko V., Mullyadzhanozov 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. P. 15.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУЙ ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОЛЕТА

А. И. Лукьянов, В. Ю. Зайцев, В. А. Мымрин,
В. И. Петошин, А. П. Чуфистов

Сибирский научно-исследовательский институт авиации
им. С. А. Чаплыгина, 630051, Новосибирск

В данной работе рассматривается возможность уменьшения посадочной дистанции самолета при помощи комбинации энергетических (обдувка самолета маршевым двигателем и обдувка нижнего крыла распределенной силовой установкой) и аэродинамических средств (повышенные углы атаки, реализуемые за счет ликвидации срыва при наличии обдува; щитки Гарни, расположенные на задней кромке закрылков верхнего и нижнего крыла; подфюзеляжные и боковые щитки).

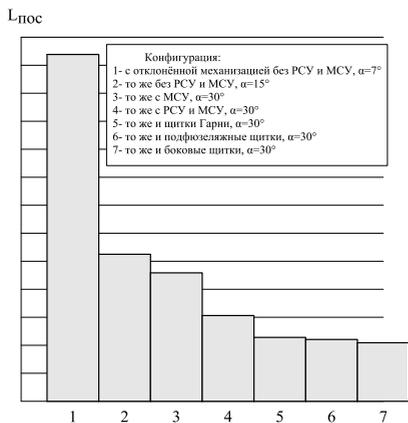


Рис. 1. Сравнение посадочных дистанций и углов атаки для разных конфигураций; МСУ — маршевая силовая установка; РСУ — распределенная силовая установка

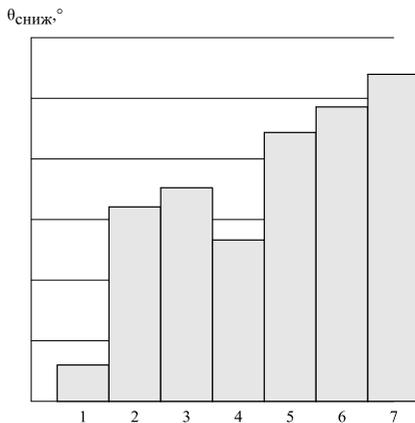


Рис. 2. Углы установившегося снижения перед посадкой для разных конфигураций

Исследовались следующие посадочные конфигурации самолета с отклоненной механизацией крыла: без обдувки; с обдувкой только от маршевой силовой установки; с обдувкой от маршевой и распределенной силовых установок; то же со щитками Гарни; то же с подфюзеляжным щитком; то же с боковыми щитками. Расчеты проведены по уравнениям движения центра масс самолета с разбиением траектории на три участка. Первый соответствует установившемуся снижению самолета с 15 м до высоты начала выравнивания. На втором участке происходит выравнивание с приращением нормальной перегрузки $\Delta n_y \approx 0,2$ и касание ВПП. Третий участок соответствует пробегу самолета.

В результате расчетов получено (рис. 1 и 2), что:

- зависимость посадочной дистанции от тяги маршевой силовой установки имеет параболический характер с наличием точки оптимума;
- в интервале углов атаки $15...25^\circ$ эффективны варианты с малой тягой, а на углах атаки $25...30^\circ$ — наоборот, варианты с высокой тягой;
- за счет обдувки от маршевой или распределенной силовой установки посадочная дистанция уменьшается примерно на 20–25 %;
- примерно такое же влияние оказывает установка щитков Гарни, тогда как применение боковых и подфюзеляжных щитков не дает существенного эффекта;
- в итоге при интенсивной обдувке от обеих силовых установок, наличии щитков Гарни и использовании угла атаки 30° на снижении можно сократить посадочную дистанцию примерно в 3–4 раза по сравнению с традиционной посадкой с малыми углами атаки и на режиме двигателя «малый газ».

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ В МОДЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ*

А. К. Максютов, Л. Г. Гонцова

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)*

В отечественных нормах летной годности самолетов транспортной категории (АП-25) и зарубежных (CS-25, FAR-25) содержатся требования по обеспечению вынужденной посадки самолета на воду. Для их выполнения необходимо исследовать вероятное поведение самолета при выполнении такой посадки. Экспериментальное исследование гидродинамики и динамики процесса посадки проводится на свободнолетающих крупномасштабных динамически подобных моделях, запускаемых с помощью катапульты, установленной на открытом водоеме.

Самолет и его модель подвержены воздействию силы тяжести, аэродинамическим и гидродинамическим нагрузкам. Для правильного воспроизведения динамики посадки натурального самолета необходимо выполнение подобия по числу Фруда

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}},$$

где V — скорость, L — характерный размер.

Из условия

$$\frac{V_M}{\sqrt{gL_M}} = \frac{V_H}{\sqrt{gL_H}},$$

где индексы «м» и «н» означают принадлежность данной величины модели или натурному самолету, следует, что скорость посадки модели

$$V_M = V_H \sqrt{L_M/L_H}$$

должна быть существенно меньше натурной.

При таком подходе не обеспечивается подобие по числу Эйлера, которое является определяющим при моделировании отрывных (кавитационных) течений.

$E_u = \frac{2p_0}{\rho V^2}$, где p_0 — давление в невозмущенном потоке; ρ — плотность

воды.

В отличие от гидросамолетов, снабженных уступами для срыва воды (реданами), сухопутные самолеты имеют плавные обводы. В связи с этим при моделировании посадки сухопутного самолета на воду возникают значительные трудности, связанные с тем, что обтекание водой глиссирующих тел с плавными обводами может происходить по-разному в зависимости от скорости движения [1]. При малых скоростях вода плавно обтекает погруженную часть тела со сходом струй с кормовой оконечности. В этом случае имеется более или менее обширная зона разрежений. Такое обтекание характерно для небольших динамически подобных моделей самолетов, движущихся по воде со скоростями, обеспечивающими подобие по числу Фруда. При очень больших скоростях глиссирования реализуется отрывное обтекание. Оно характерно для натурального самолета, совершающего вынужденную посадку на воду. Вследствие различия в обтекании поведение модели будет отличаться от поведения самолета при посадке на воду, т. е. имеет место сильный масштабный эффект.

Для приближенного воспроизведения отрывных течений в условиях модельных экспериментов были разработаны методы организации искусственного отрывного обтекания, позволяющие при небольших скоростях посадки динамически подобных моделей, соответствующих моделированию по критерию Фруда, воспроизвести натуральный характер обтекания нижней поверхности фюзеляжа. Для этого применяются различные системы, обеспечивающие ликвидацию зон разрежений на нижней поверхности хвостовой части фюзеляжа [2].

Разработанная в ЦАГИ методика моделирования вынужденной посадки на воду летательных аппаратов (ЛА) успешно применяется при исследовании приводнения ЛА различных классов. Выработанные на основании этих исследований рекомендации способствуют повышению безопасности вынужденной посадки ЛА на воду.

Список литературы

1. Шорыгин О. П., Беляевский А. Н., Гонцова Л. Г. Исследование отрыва потока при глиссировании закругленных тел // Тр. ЦАГИ: «85 лет ЦАГИ. Гидродинамика развитых кавитационных течений». М., 2003. Вып. 2644.
2. Пат. № 2724035 РФ. G01M 17/00 (2019.08); B64C 21/10 (2019.08); Y02T 70/121 (2019.08) Модель для исследования посадки самолета на воду: № 2019116754: заяв. 30.05.2019; опубл. 18.06.2020. Бюл. № 17 / Шорыгин О. П., Максютлов А. К. и др. 9 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ВИНТЕ ПОСТОЯННОГО ШАГА НА РЕЖИМЕ КОСОЙ ОБДУВКИ

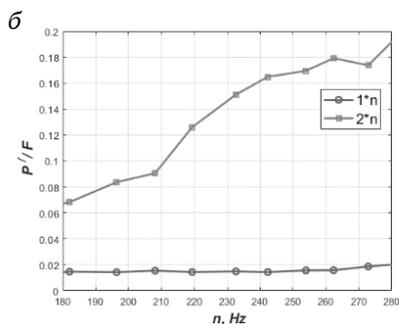
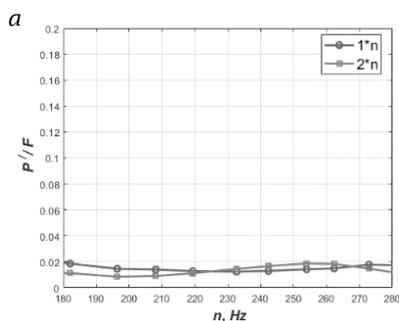
В. В. Маркин, П. А. Поливанов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

В последние годы получили большое распространение летательные аппараты мультироторной схемы (квадрокоптеры, оптокоптеры, гексакоптеры и т. д.). Несущие винты аппаратов данного класса при горизонтальном полете работают в условиях косо́й обдувки [1]. На подавляющем большинстве мультикоптеров используются воздушные винты постоянного шага, для которых косо́я обдувка не является расчетным режимом работы. В результате этого на винте формируются существенные нестационарные нагрузки, что может привести к уменьшению ресурса винтомоторной группы или даже к разрушению винта на критических режимах. Тем не менее большая часть работ, посвященных исследованию винтов мультироторных аппаратов, проводится в постановке с осевой обдувкой, что соответствует лишь режимам набора (реже — снижения) высоты в режиме висения. В связи с этим существует недостаток информации об особенностях работы винтов постоянного шага в режиме косо́й обдувки. В данной работе исследуются нестационарные нагрузки, воздействующие на винт, обтекаемый косым потоком.

Эксперимент проводился в аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН с рабочей частью $1 \times 1 \times 4$ м. Скорость набегающего потока составляла $V_\infty = 10$ м/с. Измерения сил и моментов, воздействующих на винтомоторную группу, производились при помощи шестикомпонентных тензомергических весов FTD MINI40, позволяющих измерять частоты до 1 кГц. Двухлопастной винт диаметром 7 дюймов (GEMFAN 7042R) приводился во вращение бесколлекторным электродвигателем. Исследовались частоты вращения винта в диапазоне $n = 180\text{--}280$ Гц. Весы, электродвигатель и винт располагались на альфа-механизме, который позволял изменять углы косо́й обдувки в диапазоне $\theta = 0\text{--}60^\circ$ (θ — угол между осью вращения винта и вектором скорости набегающего потока).

На рисунке продемонстрированы графики зависимости относительной амплитуды пульсаций тяги винта от частоты его вращения для двух случаев обтекания: осевого (а) и косо́го (б).



Амплитуда пульсаций силы тяги P' , отнесенная к средней результирующей силе на винте F , в зависимости от частоты вращения. Кривые с разными маркерами соответствуют единичной и удвоенной частотам пульсаций: *a* — $\theta = 0^\circ$;
б — $\theta = 45^\circ$

Видно, что при осевой обдувке на всех представленных частотах пульсации составляют порядка 2 % от средней силы на винте и вызваны, очевидно, несбалансированностью винтомоторной группы. В случае обтекания косым потоком наблюдается существенный рост пульсаций на удвоенной частоте вращения. Этот эффект можно объяснить циклическим изменением параметров потока, набегающего на лопасть в зависимости от фазы вращения, что приводит к периодическому изменению нагрузки, действующей на винт. В работе [2] на основании численного моделирования было установлено, что в режиме косой обдувки для случая безотрывного обтекания существенного роста динамических нагрузок наблюдаться не должно. Соответственно, полученные результаты могут свидетельствовать о появлении отрывных зон на лопасти в определенные моменты фазы вращения в режиме косой обдувки.

Проведенные экспериментальные исследования позволили изучить зависимость угла косой обдувки и частоты вращения на динамическую нагрузку, воздействующую на винтомоторную группу.

Список литературы

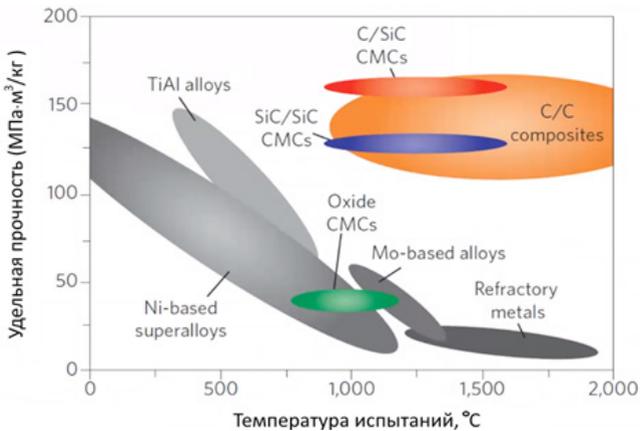
1. Polivanov P.A., Sidorenko A.A. Aerodynamic characteristics of a quadcopter with propeller // AIP Conf. Proc.: XX Int. Conf. Methods Aerophysical Res. (ICMAR-2020) (Novosibirsk, 1-7 Nov., 2020). AIP Publishing, 2021. Vol. 2351, № 1. P. 040053-1-040053-7.
2. Markin V.V., Polivanov P.A. Study of quadcopter propellers at low reynolds numbers // AIP Conf. Proc.: XX Int. Conf. Methods Aerophysical Res. (ICMAR-2020) (Novosibirsk, 1-7 Nov., 2020). AIP Publishing, 2021. Vol. 2351, № 1. P. 040025-1-040025-8.

СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СИЛОВОЙ УСТАНОВКЕ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ*

М. А. Мезенцев, Б. Мыктыбеков, А. В. Синицын,
А. Ю. Ежов, Д. С. Пальчиков, А. А. Луппов, Д. В. Афанасьев

*Центральный институт авиационного моторостроения
им. П. И. Баранова, 111116, Москва*

В настоящее время практически исчерпаны потенциальные возможности повышения рабочей температуры жаропрочных сплавов на никелевой основе для изготовления наиболее теплонагруженных узлов и деталей авиационного двигателя (АД). В связи с этим одним из возможных путей решения данной проблемы может быть создание и применение новых высокотемпературных конструкционных материалов с высокой удельной прочностью (см. рисунок) [1].



Удельная прочность конструкционных материалов

* Публикация подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 гг. при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 24 июня 2021 г. № 075-15-2021-605).

© М. А. Мезенцев, Б. Мыктыбеков, А. В. Синицын, А. Ю. Ежов, Д. С. Пальчиков, А. А. Луппов, Д. В. Афанасьев, 2023

В зарубежных исследованиях в авиационных двигателях в основном применяются керамические композиционные материалы (ККМ) с многослойной (волокнуистой) структурой [2]. Это связано с тем, что характеристики вязкости разрушения ККМ почти на порядок превышают характеристики монолитной керамики [3]. Это обстоятельство, несмотря на более низкие по сравнению с монолитной керамикой прочностные характеристики, позволило разработать из ККМ детали авиационных двигателей.

Решение проблем, связанных с работоспособностью деталей в условиях длительной работы авиационных двигателей, возможно при использовании бескерновых волокон карбида кремния (SiC_r), работающих длительно в окислительной среде при температуре до 1316°C , позволило фирмам General Electric и SNECMA применить ККМ $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$ в высокотемпературных узлах двигателей гражданской авиации LEAP и GE9x [4].

Особенностью силовой установки для сверхзвукового самолета (СПС) нового поколения является то, что при типовом полетном цикле длительность работы высокотемпературных узлов при максимальной температуре газа значительно больше, чем в дозвуковых двигателях.

Для решения перечисленных проблем в ЦИАМ ведутся исследования, связанные с разработкой нормативной документации для испытаний ККМ, разработкой расчетных математических моделей и технологий проектирования и изготовления, а также изготавливаются и проводятся испытания ККМ и изделий на их основе. Выполнены работы по созданию научно-технического задела и отработке технологии проектирования и изготовления жаровых труб из высокотемпературных ККМ, сопловых аппаратов из дисперсно-упрочненных алмазными частицами керамических материалов (алмаз/ SiC), рабочих колес и лопаток турбин из ККМ C_f/SiC и $\text{SiC}_f/\text{SiC}_m$ [5–6].

Список литературы

1. Nitin P. Padture — Advanced structural ceramics in aerospace propulsion [Online] // Nature Materials. Vol. 15. URL: <http://www.nature.com/naturematerials>.
2. Steibel J. Ceramic matrix composites taking flight at GE Aviation // Am. Ceram. Soc. Bull. 2019. Vol. 98, № 3. P. 30–33.
3. Corman G., Upadhyay R., Sinha S. General Electric Company: Selected Applications of Ceramics and Composite Materials // Mater. Res. Manuf. 2016.
4. Nakamura T., Oka T., Imanari K. Development of CMC Turbine Parts for Aero Engines // IHI Eng. Rev. 2014. Vol. 47, № 1.
5. Каримбаев Т. Д., Мезенцев М. А., Ежов А. Ю., Гордеев С. К., Корчагина С. Б. Дисперсно-упрочненные композиции алмаз-карбид кремния — новые материалы для машиностроения // Композиты и наноструктуры. 2015. Т. 7, № 2. С. 61–71.
6. Мезенцев М. А., Каримбаев Т. Д., Ежов А. Ю. Разработка и экспериментальные исследования неметаллических деталей и узлов горячей части перспективного ГТД // Вестн. СГАУ. 2015. Т. 14, № 3, ч. 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ И ФЮЗЕЛЯЖА НА СТРУКТУРУ ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПРЯМЫМ КРЫЛОМ*

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

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Изучение отрыва потока — весьма актуальная задача, поскольку данное явление сопровождается снижением подъемной силы и увеличением лобового сопротивления, что может приводить к быстрой потере высоты, сваливанию самолета в штопор и, соответственно, является неблагоприятным фактором при эксплуатации летательных аппаратов. Настоящая работа направлена на экспериментальное исследование влияния органов управления и фюзеляжа на вихревую структуру обтекания на прямом крыле и представляет собой логическое продолжение цикла исследований, посвященных изучению отрывных течений и возможностей управления обтеканием различной компоновки моделей малоразмерных летательных аппаратов (ЛА) [1–2].

В экспериментах использовалась спроектированная авторами доклада модель ЛА с прямым крылом (рис. 1). Модель имеет следующие размеры: размах крыла — 0,75 м, хорда — 0,15 м, длина фюзеляжа — 0,7 м, максимальный диаметр фюзеляжа — 0,085 м.

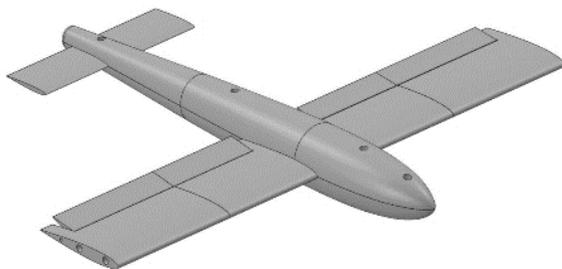


Рис. 1. Проект модели ЛА с прямым крылом

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 22-29-00309), <https://rscf.ru/project/22-29-00309/>.

© Е. А. Мельник, А. М. Павленко, Н. С. Алпацкий, Б. Ю. Занин, В. С. Каприлевская, 2023

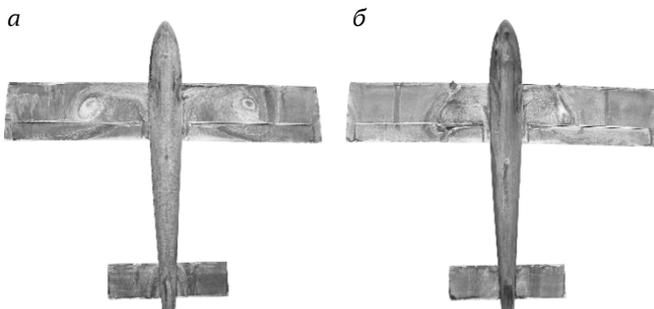


Рис. 2. Результаты саже-масляной визуализации на угле атаки 10° :
 а — без выступов; б — с выступами

Исследования проводились в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 [3] при различных углах атаки, не превышающих 14° , а также при углах скольжения 0 и 20° . Скорость набегающего потока варьировалась в диапазоне от 15 до 25 м/с, число Рейнольдса по хорде $Re = 1,5-2,5 \times 10^5$. Визуализация течения осуществлялась с помощью метода саже-масляных покрытий.

Особенностью работы стало то, что исследования проводились не только на верхней поверхности крыла без фюзеляжа и с ним, но и на нижней. Кроме того, для изучения возможности управления обтеканием с помощью локального воздействия вблизи передней кромки крыла устанавливались выступы в форме конуса с диаметром основания 8 мм и высотой 15 мм.

В результате проведенных экспериментов были получены картины визуализаций обтекания модели при различных режимах. Показана возможность изменения структуры течения с помощью локального воздействия (рис. 2).

Список литературы

1. Pavlenko A. M., Zanin B. Yu., Katasonov M. M. Flow around a small sized UAV model in a turbulent trace // XIX Int. Conf. Methods Aerophysical Res. (ICMAR-2018) (Novosibirsk, Russia, 13–19 Aug., 2018). AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 2027, No. 1. S. 1. P. 040004(7).
2. Павленко А. М., Занин Б. Ю., Катасонов М. М. Исследования обтекания модели летающего крыла при натуральных числах Рейнольдса // Вестн. НГУ. Серия: Физика. 2015. Т. 10, № 3. С. 19–25.
3. Багаев Г. И., Голов В. К., Медведев Г. В., Поляков Н. Ф. Аэродинамическая труба малых скоростей Т-324 с пониженной степенью турбулентности // Аэрофизические исследования. 1972. Вып. 1. С. 5–8.

ТЕЧЕНИЕ ПОТОКА ГАЗА С ТРЕНИЕМ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

А. Ю. Мельников

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630096, Новосибирск*

Течение газа в каналах считается достаточно простой и хорошо изученной задачей промышленной аэродинамики. Известны различные инженерные методики расчета длинных цилиндрических каналов с учетом потерь давления на трение, позволяющие определять скорость течения, расход газа и потери давления. Однако, как показано ниже, при больших скоростях течения известные методики могут приводить к существенным ошибкам в расчетах параметров потока. В работе предлагается новый подход к расчету течения в длинных каналах, позволяющий существенно повысить точность вычислений.

Как правило, расчет характеристик течения в трубопроводе завершается на этапе определения потерь полного давления по формуле Дарси [1].

$$\Delta P_0 = \zeta \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1)$$

где ζ — коэффициент гидравлического сопротивления или коэффициент потерь давления [2].

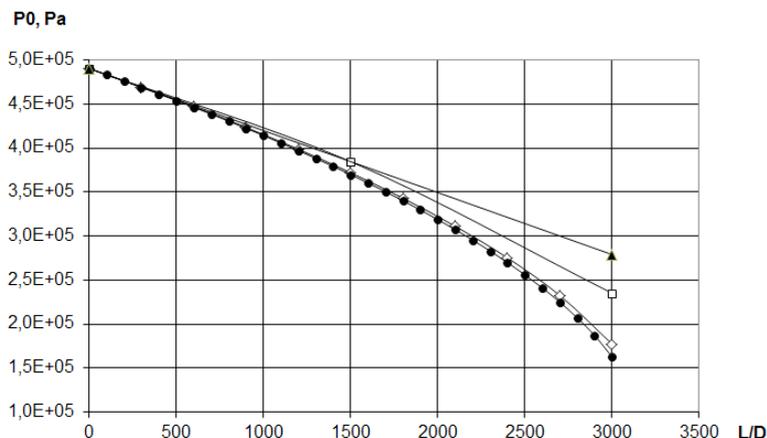
При этом значения плотности и скорости, необходимые для вычисления скоростного напора, берутся на входе в рассматриваемый участок трубы. Такой подход справедлив и хорошо апробирован для небольших скоростей течения несжимаемого газа в канале.

Однако при внимательном рассмотрении можно убедиться, что в вышеописанной методике расчета содержится ряд неточностей и она нуждается в корректировке отдельных принципиальных положений.

Прежде всего требуется уточнить размер L (длину) канала, на котором выполняется интегрирование формулы (1). Легко показать, что при различной длине и различном количестве участков, на которые разбивается канал при расчете, результаты будут существенно различаться, особенно при больших скоростях, где начинает сказываться сжимаемость течения.

На рисунке показаны результаты расчета полного давления для одного и того же канала при разном количестве расчетных участков одинаковой

длины [3]. Параметры потока на выходе из предыдущего участка являются параметрами на входе последующего. Видно, что по мере увеличения количества участков получаемые результаты все больше сближаются между собой, заметно отличаясь от результата, когда весь канал рассматривается как один расчетный участок.



Расчет падения полного давления с разбиением канала на 1, 2, 20 и 30 расчетных участков

Показанный эффект влияния количества участков разбиения говорит о необходимости непосредственного применения дифференциального уравнения (1) при проведении точных и ответственных расчетов.

Список литературы

1. Идельчик Е.И. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
2. Никурадзе И. Закономерности турбулентного движения в гладких трубах // Проблемы турбулентности / под ред. М.А. Великанова и Н.Г. Швейковского. М., 1936. С. 75-150.
3. Zvegintsev V.I., Melnikov A. Yu. One-dimensional model for calculating compressible gas flow with friction through pipeline // Pipelines: Design, Applications and Safety / ed. M.G. Rivero et al. S. l.: Nova Science Publishers, 2012. P. 207-224. (Construction Materials and Engineering).

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ТЕРМОАНЕМОМЕТРА ПРИ ЧИСЛАХ МАХА ОТ 0,2 ДО 2*

Е. А. Меркулова, О. И. Вишняков, Ю. В. Громыко

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Термоанемометр является востребованным инструментом экспериментального исследования потока за счет своей информативности, широкой области его применения и доступности. Однако в экспериментах с течением вблизи стенки, в трансзвуковом течении, течении в области ударной волны возникает проблема калибровки датчика [1–3].

Данная работа посвящена численному исследованию зависимости теплообмена датчика от параметров потока и является предварительным этапом создания виртуального термоанемометра. Виртуальная модель поможет смоделировать отклик датчика при измерениях вблизи стенки или ударной волны, а также отклик на возмущения разной природы.

Расчет обтекания чувствительного элемента (ЧЭ) датчика термоанемометра в свободном потоке проводился на сетке с 39 000 ячеек с использованием ламинарной модели вязкости. Диаметр ЧЭ был равен 0,01 мм. Исследовался тепловой поток, исходящий с поверхности ЧЭ с фиксированным коэффициентом перегрева $a_w \approx 0,74$ при температуре торможения в потоке 290 К.

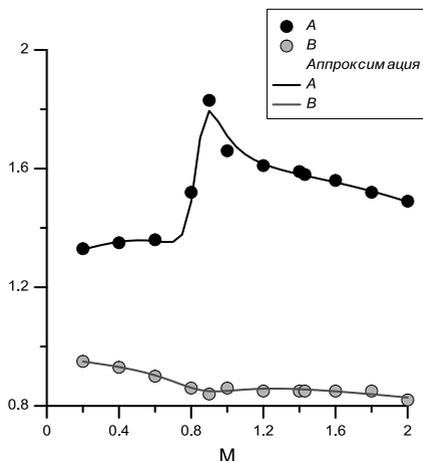
Расчеты проводились для диапазона чисел Рейнольдса от 31 до 157 и числа Маха от 0,2 до 2,0, всего было рассчитано 84 случая.

Для каждого из чисел Маха методом наименьших квадратов были получены линейные аппроксимации числа Нуссельта в зависимости от корня из числа Рейнольдса и вычислены коэффициенты A и B :

$$Nu = A(M, a_w) + B(M, a_w) \sqrt{Re}.$$

По полученным коэффициентам была составлена эмпирическая зависимость коэффициентов $A(M)$ и $B(M)$ от числа Маха, результаты аппроксимации представлены на рисунке.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 22-21-20098).
© Е. А. Меркулова, О. И. Вишняков, Ю. В. Громыко, 2023



Зависимость коэффициентов A и B от числа Маха для перегрева $a_w \approx 0,74$

Список литературы

1. Лебига В. А. Исследование высокоскоростных течений с помощью термоанемометра // Модели и методы аэродинамики: Материалы I и II Междунар. школ-семинаров. Евпатория: Моск. центр непрерывного матем. образования, 2002. С. 100–101.
2. Лебига В. А., Пак А. Ю., Зиновьев В. Н., Миронов Д. С. Тарировка датчиков термоанемометра с использованием течения Куэтта в полукольцевом канале // Кимила-2020: Материалы IV Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов. Жуковский: ФГУП «ЦАГИ», 2020. С. 380–387.
3. Бойко А. В., Корнилов В. И. Измерение локального коэффициента поверхностного трения с помощью термоанемометра // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 4. С. 613–623.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ СМЕШЕНИЯ В КАНАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПРИ ПОМОЩИ ТЕЛ МАЛОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

А. В. Минко, В. С. Захаров, О. В. Гуськов

*Центральный институт авиационного моторостроения
им. П. И. Баранова, 111116, Москва*

Широко распространены задачи интенсификации смешения нескольких газов в каналах различного поперечного сечения [1, 2]. Традиционный смеситель [3] представляет собой плохообтекаемое тело, за которым создается обширная зона с высоким уровнем турбулентности потока и крупные вихри газа. В приведенном исследовании решалась задача создания требуемого уровня перемешивания при малом сопротивлении смесителей. Рассматривались различные конфигурации смешивающих устройств в виде набора отклоняющих поток лопаток, поочередно повернутых относительно продольного направления канала в противоположных направлениях. Варьировалось число поворотных лопаток, их форма (каплевидные, профилированные), угол поворота относительно продольной оси. Критерием оценки смесителей являлись эффективность перемешивания двух газов, аэродинамическое качество и коэффициент лобового сопротивления.

В настоящей работе расчеты параметров течения выполнены с помощью трехмерного численного моделирования. Решалась система уравнений Навье — Стокса для смеси газов (O_2 и N_2). Расчет проводился с локальным шагом по времени, схема вычисления потоков — AUSM+.

Рассмотренные конфигурации смешивающих устройств позволяют получить высокий уровень перемешивания при снижении гидравлического сопротивления в сравнении с традиционными смесителями плохообтекаемой формы.

Список литературы

1. Latypov A. F. Control of mixing of gas flows // Thermophys. Aeromechanics. 2022. № 29 (2). P. 179–184.
2. Rogalev A., Kocherova A., Kindra V., Komarov I., Osipov S. Application of new flow stabilizers to reduce the flow non-uniformity // Contemporary Eng. Sci. 2015. Vol. 8, № 31.
3. Нечаев Ю. Н., Федоров Р. М., Котовский В. Н., Полев А. С. Теория Авиационных двигателей. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. Ч. 1. С. 251–252.

© А. В. Минко, В. С. Захаров, О. В. Гуськов, 2023

ГОРЕНИЕ ПРОПАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЗАМКНУТОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПРИ ЗАЖИГАНИИ С ДВУХ ТОРЦОВ*

А. А. Митрофанов, Р. Р. Тлеуленов, А. Ю. Крайнов

Томский государственный университет, 634050, Томск

Пропан с содержанием горючей компоненты, близким к стехиометрическому, способен гореть с образованием неустойчивого фронта горения [1]. Представляет интерес параметрическое исследование образования неустойчивого пламени. Задача формулируется в двухмерной осесимметричной постановке. Предполагается, что воспламенение газовой смеси происходит с двух торцов цилиндрического канала. Основные допущения физико-математической модели соответствовали [2]. Задача формулируется системой уравнений сохранения массы, импульса и энергии газа в неизобарической двухмерной осесимметричной постановке. Учитываются процессы теплопроводности и диффузии газа.

Схема канала и расположение участков воспламенения представлены на рис. 1. Протяженность канала равна L , радиус канала задавался равным R . Прямоугольниками отмечено расположение очагов воспламенения. В начальный момент времени в очаге задавался участок с повышенной температурой газа. За счет высокой температуры газ воспламенялся и начинал гореть. Реализовывались два фронта пламени газовой смеси.

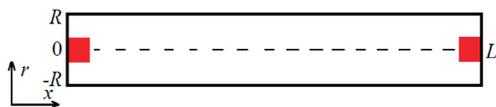


Рис. 1. Схема цилиндрического канала

На рис. 2 представлены распределения температуры газа по пространству в различные моменты времени. Заметно, что формируется неустойчивое пламя, связанное со взаимодействием продуктов горения с несгоревшей смесью. Отражение волн давления от стенок канала и взаимодействие с несгоревшей смесью разрушает фронт пламени. Согласно рис. 2, струж-

* Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2020-0036).

© А. А. Митрофанов, Р. Р. Тлеуленов, А. Ю. Крайнов, 2023

тура фронта может содержать до пяти лепестков тюльпана. Скорость распространения пламени по мере его продвижения по каналу имеет четко выраженные максимумы. При взаимодействии продуктов горения с горячей смесью наблюдается периодическое ускорение и замедление пламени.

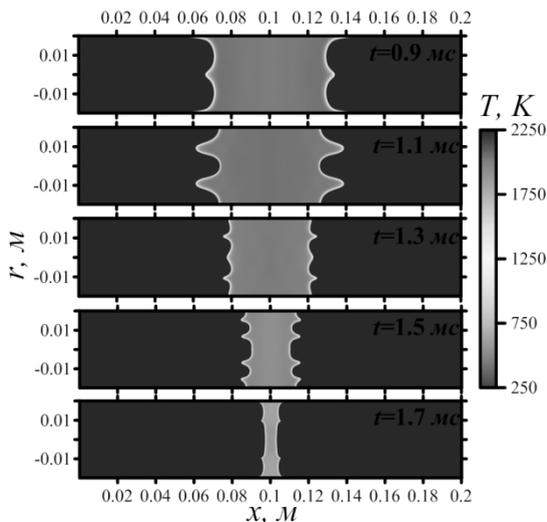


Рис. 2. Распределения температуры газа. Коэффициент избытка окислителя — 0,96

Уменьшение содержания горючей компоненты в газе приводит к горению газа с меньшей скоростью, что, в свою очередь, приводит к меньшей неустойчивости на фронте горения. Результаты исследования горения пропановоздушной смеси с коэффициентом избытка окислителя, равным 1,3, показали, что фронт горения искривлен, но формирование тюльпанообразного пламени не происходит. Скорость распространения пламени снизилась по сравнению с рис. 2. В результате при взаимодействии продуктов сгорания со свежей несгоревшей смесью неустойчивость проявилась только в ускорении горения вдоль стенок по сравнению с горением по центру канала.

Список литературы

1. Shen X., He X., Sun J. A comparative study on premixed hydrogen-air and propane-air flame propagations with tulip distortion in a closed duct // Fuel. 2015. Vol. 161. P. 248–253.
2. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu., Krainov D. A. Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture // IOP Conf. Series: Materials Sci. Eng. 2019. № 696 (1). P. 012011.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ В ОБЪЕМЕ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В РЕГЕНЕРАТИВНОЙ МЕДИЦИНЕ*

Е. С. Мороков

*Институт биохимической физики
им. Н. М. Эмануэля РАН, 119334, Москва*

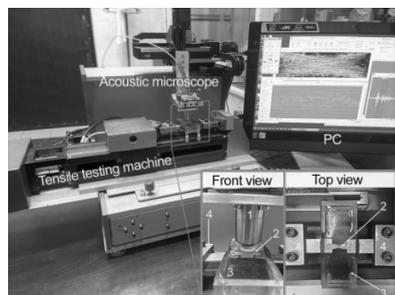
Нетканые материалы являются многообещающими объектами в регенеративной медицине, где искусственные структуры имитируют внеклеточный каркас ткани. Создание и исследование искусственных каркасов с контролируемой микроструктурой и свойствами являются основными задачами в отрасли. Однако важно не только описывать структуру в исходном состоянии, но и оценить возможные изменения материала в живом организме. Один из факторов — это механическое воздействие в водной среде. Как правило, оценка характеристик матрикса, в том числе механического поведения, проводится в воздушной среде, что далеко от естественных условий живого организма. Исследования механического поведения материалов во влажной среде ограничены особенностями методов визуализации. Оптимальными методами исследования объектов во влажной среде являются ультразвуковые методы, для которых обязательным условием проведения эксперимента становится погружение образца в воду.

В данной работе представлен новый подход к изучению микромеханики волокнистых материалов, основанный на применении высокочастотной (200 МГц) акустической микроскопии, совмещенной с горизонтальной машиной механического нагружения [1]. Экспериментальное оборудование, представленное на рисунке, позволяет проводить *in situ* визуализацию микроструктурных преобразований в объеме материалов с тонкой волокнистой структурой. Изменения в ориентации, расстоянии и плотности упаковки волокон напрямую влияют на клеточную адгезию, пролиферацию и миграцию в объеме нетканого каркаса. В ходе экспериментов выявлены механизмы разматывания, удлинения, ориентации и деформации волокон при одноосном растяжении. Описаны процессы, обуславливающие упругую и пластичную деформацию нетканых каркасов.

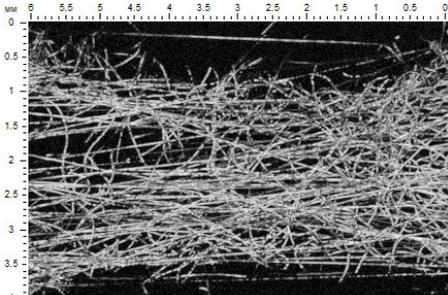
* Работа выполнена в рамках проекта РФФ (№ 22-72-00043).

© Е. С. Мороков, 2023

a



б



Ультразвуковая визуализация объемной микроструктуры нетканых материалов при растяжении: *a* — экспериментальная установка, состоящая из акустического микроскопа и горизонтальной испытательной машины; *б* — ультразвуковое изображение микроструктуры нетканого образца на глубине 200 мкм

Список литературы

1. Morokov E., Zykova A., Tyubaeva P. Non-woven scaffolds under tension: in situ high resolution ultrasound observation of microstructure evolution in the volume // Adv. Eng. Materials. 2021. № 23. P. 2001373.

ОПТИМАЛЬНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ И ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Ю. М. Нечепуренко¹, А. В. Бойко^{1,2},
К. В. Демьянко¹, Г. В. Засько¹

¹Институт вычислительной математики
им. Г. И. Марчука РАН, 119333, Москва

²Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск

Интерес к анализу устойчивости динамических систем в терминах оптимальных возмущений существенно возрос за последнее десятилетие в связи с более глубоким осознанием роли оптимальных возмущений в реализации «неляпуновских» сценариев выхода из области притяжения устойчивых стационарных и периодических решений, когда возможные воздействия на исходную систему не ограничиваются начальным возмущением, как в ляпуновской теории устойчивости. На практике обычно возмущений много, и они воздействуют на систему не одновременно. Возмущение, не выводящее систему из области притяжения устойчивого стационарного либо периодического решения, может существенно ослабить устойчивость к другим возмущениям и в условиях множественности возмущений привести к выходу из области притяжения. Примером может служить обходной сценарий ламинарно-турбулентного перехода [1–4], при котором первоначальное малое возмущение особого вида, развиваясь, переводит исходное ламинарное течение в квазистационарное состояние, неустойчивое к малым возмущениям другого типа (вторичная неустойчивость). Эти повторные возмущения и вызывают переход к турбулентности. Подобные, «неляпуновские» сценарии возможны и в других областях.

В последние годы, в том числе силами авторов доклада, удалось существенно продвинуться в решении ряда проблем, связанных с оптимальными возмущениями. В частности, были разработаны новые, более эффективные методы вычисления оптимальных возмущений стационарных решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Был исследован ряд турбулентных течений специального вида (в основном устойчиво стратифицированных, близких по свойствам к атмосферному пограничному слою), и показано, что наблюдаемые в них крупномасштабные организованные

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-11-00025).
© Ю. М. Нечепуренко, А. В. Бойко, К. В. Демьянко, Г. В. Засько, 2023

структуры являются оптимальными возмущениями осредненного турбулентного течения [5, 6]. Понятие оптимального возмущения стационарного решения и методы его вычисления были обобщены на периодические решения и на системы с запаздыванием [7, 8]. Также было показано, что оптимальные возмущения можно использовать для перевода бистабильной биологической системы из одного стационарного либо периодического состояния в другое, причем осуществляющее этот переход оптимальное возмущение можно сформировать из элементарных воздействий, которые реализуемы в клинической практике.

Благодаря этому стало возможным вплотную подойти к решению таких актуальных и существенно более сложных проблем, как:

- эффективный расчет базиса оптимальных возмущений трехмерных ламинарных пограничных слоев для разложения по нему произвольных возмущений;
- разработка аналога $\exp(N)$ -метода (см. [4, 9] и их библиографии) для прогноза положения ламинарно-турбулентного перехода при обходном сценарии;
- расчет коэффициентов восприимчивости на основе оптимальных возмущений;
- анализ на основе оптимальных возмущений механизмов возникновения и развития крупномасштабных структур в турбулентных пограничных слоях общего вида.

Данный доклад посвящен обсуждению упомянутых выше уже полученных результатов, связанных с оптимальными возмущениями, и перспектив дальнейшего развития этого направления.

Список литературы

1. Andersson P., Berggren M., Henningson D. S. Optimal disturbances and bypass transition in boundary layers // *Phys. Fluids*. 1999. Vol. 11, № 1. P. 134–150.
2. Reshotko E., Tumin A. Application of transient growth theory to bypass transition // *IUTAM Symposium One Hundred Years Boundary Layer Research*. Springer, Dordrecht. 2006. P. 83–93.
3. Schmid P. J. Nonmodal stability theory // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2007. Vol. 39. P. 129–162.
4. Boiko A. V., Dovgal A. V., Grek G. R., Kozlov V. V. *Physics of Transitional Shear Flows*. Springer, Berlin, 2012.
5. Cossu C., Pujals G., Depardon S. Optimal transient growth and very large-scale structures in turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2009. Vol. 619. P. 79–94.
6. Zasko G. V., Glazunov A. V., Mortikov E. V., Nechepurenko Yu. M., Perezhogin P. A. Optimal energy growth in stably stratified turbulent Couette flow [Online] // *Boundary-Layer Meteorology*. 2022.

7. Bocharov G.A., Nechepurenko Yu. M., Khristichenko M. Yu., Grebennikov D.S. Optimal perturbations of systems with delayed independent variables for control of dynamics of infectious diseases based on multicomponent actions // J. Math. Sci. 2021. Vol. 253. P. 618–641.

8. Khristichenko M. Yu., Nechepurenko Yu. M. Optimal disturbances for periodic solutions of time-delay differential equations // Russ. J. Num. Anal. Math. Model. 2022. Vol. 37, № 4. P. 203–212.

9. Boiko A.V., Demyanko K.V., Kirilovskiy S.V., Nechepurenko Yu. M., Poplavskaya T.V. Modeling of transonic transitional three-dimensional flows for aerodynamic applications // AIAA J. 2021. Vol. 59, № 9. P. 3598–3610.

ИЗМЕНЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ И АБСОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ БИОУГЛЯ ПРИ ЕГО ЗАЛЕГАНИИ В ПОЧВЕ*

Г.Л.О. Обаид, Н.А. Иванова, Ф.Р. Сулкарнаев

Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень

Один из путей повышения продуктивности почв основан на внесении в нее биоугля, получаемого из отходов сельхозпродукции и древесины путем низкотемпературного пиролиза. Биоуголь улучшает структуру почвы, регулирует водный и газовый баланс, накапливает питательные вещества и является базой для развития полезных микроорганизмов [1]. Во всех этих процессах смачиваемость биоугля и способность удерживать влагу представляют критические параметры [2]. В этой связи понимание механизмов деградации/изменения смачивающих и абсорбционных свойств биоугля при его длительном нахождении в почве крайне важно.

В данной работе проведено сравнительное исследование трех образцов биоугля: контрольного, находившегося в течение эксперимента в контакте с воздухом; извлеченного из почвы после семи лет залегания; образца из почвы с добавлением удобрений. Измерена кинетика смачивания и впитывания микрокапель воды и растворов ПАВ на поверхности образцов, рассчитаны полярные и дисперсионные компоненты свободной энергии их поверхностей, измерено время впитывания жидкости в образцы и их сорбционная емкость. Методом сканирующей электронной и дисперсионной микроскопии изучена структура поверхности образцов и ее элементный состав. Установлено, что контрольные образцы незначительно гидрофилизуются в процессе окисления, но остаются в целом гидрофобным материалом. Воздействие почвы приводит к существенному улучшению смачиваемости поверхности образца и его сорбционных свойств за счет увеличения пористости и уменьшения в составе поверхностного слоя углерода. На образцах из почвы имеет место мгновенный переход от смачивания в режиме Касси — Бакстера (несмачивание) к режиму Венцеля (полному смачиванию). Влияние удобрения отмечается снижением смачиваемости образцов из-за покрытия поверхности органическим материалом, закрывающим поровое пространство. Механизм одновременного смачивания и впитывания

* Работа выполнена при поддержке программы развития университета «Приоритет-2030», проект «Биобезопасный мир: эффективный ответ на существующие и новые биологические угрозы».

© Г. Л. О. Обаид, Н. А. Иванова, Ф. Р. Сулкарнаев, 2023

рассмотрен в рамках моделей пористой мембраны с продольным [3] и вертикальным впитыванием [4] в образец. Модификация поверхности образцов амфифильными молекулами ожидаемо повысила смачиваемость и абсорбционную емкость контрольных образцов биоугля по сравнению с исходным образцом и образцами из почвы.

Результаты работы позволяют сделать следующий вывод: естественная гидрофилизация биоугля за счет длительного воздействия почвы и предварительная (перед закладкой в почву) модификация его поровой поверхности амфифильными молекулами могут дать синергетический эффект, заключающийся в интенсификации процесса накопления влаги и полезных веществ в почве, что способствует решению проблемы истощения и обезвоживания почв [1, 2].

Список литературы

1. Ding Y., Liu Y., Liu S. et al. Biochar to improve soil fertility. A review // *Agron. Sustain. Dev.* 2016. Vol 36. P. 36.
2. Usevičiūtė L., Baltrėnaitė E. Methods for Determining Lignocellulosic Biochar Wettability // *Waste and Biomass Valorization*. 2020. Vol. 11. P. 4457–4468.
3. Starov V.M., Zhdanov S.A., Kosvintsev S.R., Sobolev V.D., Velarde M. G. Spreading of liquid drops over porous substrates // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2003. № 104. P. 123–158.
4. Daniel R. C., Berg J. C. Spreading on and penetration into thin, permeable print media: Application to ink-jet printing // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2006. P. 123–126, 439–469.

ДЕАЛЛОИНГ В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ ДЛЯ СИНТЕЗА МИКРОНАНОПОРИСТЫХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ БИМЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ*

А. В. Окулов, О. С. Юсупова, Н. В. Казанцева

*Институт физики металлов
им. М. Н. Михеева УрО РАН, 620108, Екатеринбург*

В работе представлен краткий обзор метода деаллоинга в жидком металле для синтеза низкомодульных пористых материалов и описаны фундаментальные принципы, необходимые для активации данного процесса. Благодаря своим превосходным механическим свойствам так называемые высокоэнтропийные сплавы (ВЭСы) предлагаются в качестве перспективных материалов для обработки методом деаллоинга и получения в них микронанопористой структуры.

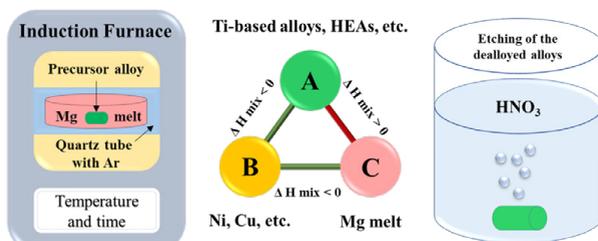
Деаллоинг в жидком металле представляет собой металлургический процесс получения пористых материалов с помощью селективной коррозии в жидком металле [1]. Данный метод может применяться для получения микронаноструктуры в менее благородных металлах, таких как Ti, Zr, Nb, Hf и др.

В указанном методе используется диффузия жидкого металла в материал-предшественник, сопровождаемая селективным растворением одного или нескольких компонентов. Оставшаяся часть материала-предшественника не смешивается с жидким металлом и перестраивается в непрерывный каркас, состоящий из взаимосвязанных лигаментов. Размер (средняя толщина) лигаментов пористых материалов, получаемых методом деаллоинга, может быть эффективно настроен из диапазона от нано- до микрометров путем контроля условий обработки [1–5].

За последние десять лет была проведена колоссальная работа по разработке и синтезу пористых материалов на основе титана. Однако разработка пористых материалов методом деаллоинга из ВЭСов, обладающих комплексом благоприятных механических характеристик (высокой прочностью и пластичностью, высокой коррозионной и износостойкостью, низким модулем Юнга по сравнению с традиционными медицинскими материалами), находится в зачаточном состоянии и требует детальных исследований.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (шифр «Аддитивность» № 121102900049-1).

© А. В. Окулов, О. С. Юсупова, Н. В. Казанцева, 2023



The processes occurring during the liquid metal dealloying

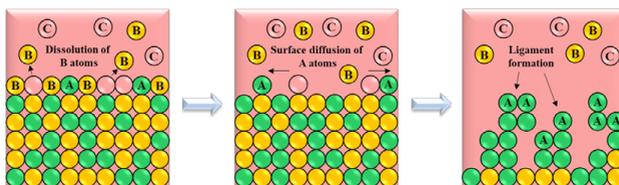


Схема синтеза микронанопористых материалов методом деаллоинга в жидком металле [2]

Таким образом, разработка и синтез биоВЭСов с рядом благоприятных механических свойств и введение в них пористости методом деаллоинга в жидком металле для снижения модуля Юнга при сохранении высокой прочности и пластичности является актуальной задачей в контексте биомедицинского применения, в частности, для синтеза нового класса имплантационных материалов.

Список литературы

1. Okulov I. V., Weissmüller J., Markmann J. Dealloying-based interpenetrating-phase nanocomposites matching the elastic behavior of human bone // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7, № 20. P. 1–7.
2. Okulov I. V., Okulov A. V., Soldatov I. V., Luthringer B., Willumeit-Römer R., Wada T., Kato H., Weissmüller J., Markmann J. Open porous dealloying-based biomaterials as a novel biomaterial platform // *Mater. Sci. Eng. C.* 2018. Vol. 88. P. 95–103.
3. Okulov I. V., Okulov A. V., Volegov A. S., Markmann J. Tuning microstructure and mechanical properties of open porous TiNb and TiFe alloys by optimization of dealloying parameter // *Scr. Mater.* 2018. Vol. 154. P. 68–72.
4. Okulov A. V., Volegov A. S., Weissmüller J., Markmann J., Okulov I. V. Dealloying-based metal-polymer composites for biomedical applications // *Scr. Mater.* 2018. Vol. 146. P. 290–294.
5. Okulov A. V., Joo S.-H., Kim H. S., Kato H., Okulov I. V. Nanoporous High-Entropy Alloy by Liquid Metal Dealloying // *Metals.* 2020. Vol. 1396, № 10 (10). P. 1–7.

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

С. М. Орлова, А. С. Епихин, И. И. Бут, А. В. Кухарский

Институт системного программирования РАН, 109004, Москва

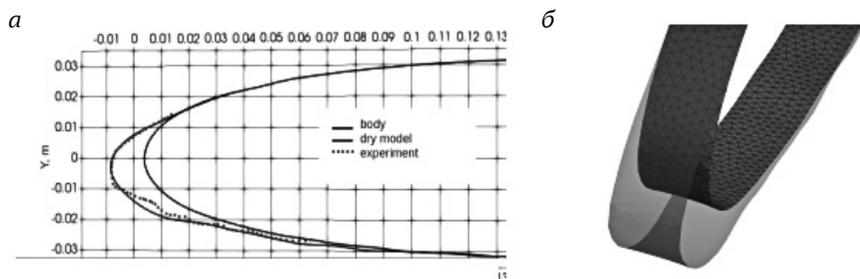
Поскольку при полете самолета неизбежно воздействие низких температур, необходимо просчитать возможные риски в ситуации обледенения как до взлета, так и во время полета воздушного судна. Лед на крыльях самолета добавляет летательному аппарату вес и меняет его аэродинамические характеристики, что негативно сказывается на работе двигателя и увеличивает расход топлива, а также может привести к аварии. Поэтому перед специалистами авиапрома стоит задача обеспечения безопасности полетов и сертификации продукции авиационной промышленности во всех условиях обледенения. Современные трехмерные средства моделирования обледенения являются одним из способов подтверждения соответствия летательных аппаратов. Их наличие особенно важно для тех условий, наземное стендовое моделирование которых затруднено, в частности условий переохлажденно-го дождя.

Данная работа посвящена разработке трехмерных программных средств для моделирования обледенения и комплексному исследованию процесса в различных условиях обтекания, включая мелкие и крупные капли. Математическая модель предполагает, что в расчетной области присутствуют следующие фазы: газ (воздух), переохлажденные капли воды, лед с пленкой воды.

Разработка велась на основе программного пакета OpenFOAM с открытым исходным кодом. Для численной аппроксимации уравнений движения и баланса массы воздушного потока использовались подходы на основе интегро-интерполяционного метода. Для профилей и геометрии наледи — метод погруженных границ [1]. Для описания термогидродинамики пленки воды реализованы следующие подходы: модель сухого льда, модель Майерса. Уравнения этих моделей аппроксимируются на конечно-элементной сетке явным методом Эйлера. Для определения объемной доли льда используется алгоритм MULES [2].

Исходные данные для тестовых задач были взяты из работ [3, 4], в которых описаны экспериментальные условия и представлены графики нарастания льда на различных видах крыльев. На рисунке представлены

результаты трехмерного моделирования задачи обтекания профиля крыла NASA0012 и приведено сравнение с экспериментом.



Сравнение численного расчета и эксперимента обтекания профиля NASA0012: а — численное решение, полученное с помощью модели сухого льда в сравнении с экспериментом; б — трехмерная визуализация численного расчета

Сопоставление результатов расчета показало удовлетворительное соответствие численной модели физическому эксперименту и результатам мировых коммерческих программ. Погрешность расчета обледенения не превышала 7 %.

Список литературы

1. Xu Y., Liu X. An immersed boundary method with y^+ -adaptation wall function for smooth wall shear // Int. J. Numer. Methods Fluids. 2021.
2. OpenFOAM 2,3.0: Multiphase Modelling [Online]. URL: <https://openfoam.org/release/2-3-0/multiphase/> (accessed on 16.05.2022).
3. Shin J., Thomas B. Results of an icing test on a NACA 0012 airfoil in the NASA Lewis Icing Research Tunnel // 30th Aerospace Sci. Meeting Exhibit. 1992.
4. Potapczuk M.G. Ice mass measurements: Implications for the ice accretion process // 41st Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. 2003.

СТРУКТУРНАЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ РАЗЛОМОВ

А. А. Остапчук

*Институт динамики геосфер
им. акад. М. А. Садовского РАН, 119334, Москва*

Нарушенность земной коры является главной структурной особенностью, определяющей закономерности ее эволюции. Крупные разломы делят земную кору на геоблоки, внутри которых можно выделить разломы и трещины меньшего ранга. Разломы характеризуются дискретностью, анизотропией, гетерогенностью и определяют, несмотря на их небольшую долю в объеме коры, закономерности релаксации накопленной в земной коре упругой энергии деформации.

Долгое время предполагалось, что накопившиеся избыточные напряжения в массиве горных пород снимаются либо посредством землетрясений при быстром динамическом проскальзывании (со скоростями более м/с) по границам геоблоков, либо через непрерывное асейсмическое скольжение (со скоростью см/год). Однако открытие в последние десятилетия таких деформационных событий, как низкочастотные и очень низкочастотные землетрясения, события медленного скольжения и эпизодический невулканический тремор, изменяют наше понимание того, как реализуется энергия, накопленная в процессе деформирования земной коры.

Установление закономерностей формирования, иницирования и трансформации различных режимов скольжения по разломам критически важно при решении многих фундаментальных и прикладных задач геомеханики, сейсмологии и горных наук. В настоящее время не существует моделей активного разлома, объясняющих весь спектр деформационных явлений, приуроченных к зонам разломов, и их пространственно-временную эволюцию.

По мере накопления наблюдательного и экспериментального материала появляется все больше моделей, направленных на объяснение и уточнение наблюдаемых закономерностей процесса деформирования разломных зон. Исследования процессов, протекающих в разломных зонах, требуют применения мультидисциплинарного подхода, интеграции комплексного геофизического мониторинга активных разломов, геологических изысканий строения разломов и физического моделирования динамики сложных систем.

Для «согласования» всех исследований в рамках единого формализма эффективно разделение проблемы на структурную и механическую составляющие. Структурная составляющая должна быть направлена на выявление участков локализации деформационных процессов в текущий момент времени и установление закономерностей пространственного распределения вещественного состава и фрикционных свойств вдоль разломов. Геомеханическая составляющая должна быть направлена на оценку близости локального участка разлома к моменту потери динамической устойчивости и оценку кинематических и энергетических параметров динамических событий.

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНЫХ ЗПК ДЛЯ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ*

**Н. Н. Остриков, В. В. Башкатов, С. Л. Денисов,
М. А. Яковец, М. С. Ипатов**

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, Московский комплекс, 105005, Москва*

Наиболее эффективным способом снижения шума вентилятора авиадвигателя является облицовка его каналов звукопоглощающими конструкциями (ЗПК), параметры которых подбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальное снижение шума на местности при различных режимах работы двигателя в течение взлетно-посадочного цикла полета самолета. Звук распространяется по каналам двигателя в виде суперпозиции — так называемых вращающихся звуковых мод. Если стенки канала облицованы ЗПК, характеризующимися некоторым комплексным значением импеданса, то на каждой частоте каждая распространяющаяся звуковая мода приобретает индивидуальное затухание. Суммарное затухание звукового поля в канале двигателя определяется модальным составом звукового поля, т. е. распределением амплитуд между различными звуковыми модами, генерируемыми вентилятором.

В отличие от строительной акустики, где успех звукопоглощения на стенках помещений определяется за счет увеличения коэффициента звукопоглощения материалов облицовок, создание эффективных ЗПК для ТРДД является комплексной научной проблемой. Она включает в себя решение специфических волноводных прямых и обратных задач распространения звука в канале с потоком и дифракционную задачу излучения звука из открытого конца волновода, что необходимо для определения оптимальных импедансных граничных условий, обеспечивающих наибольшее снижение шума, излучаемого из канала при заданных геометрических параметрах системы и модальном составе звукового поля, генерируемого вентилятором.

Последние исследования показывают необходимость учета при настройке ЗПК следующих эффектов, которыми ранее пренебрегали. На диаграмму направленности звука в дальнем поле существенное влияние оказывают эффекты отражения и рефракции звука в неоднородном потоке, имеющем

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 19-71-10064).

место вблизи среза воздухозаборника. На стыках облицовок канала наблюдается как отражение звука, так и перераспределение амплитуд звуковых мод при их прохождении через разрыв импеданса. На значения осевых волновых чисел звуковых мод прямое влияние оказывает наличие пограничного слоя в потоке. Также важно учитывать и нелинейный эффект работы ЗПК (зависимость импеданса от уровня звукового давления), который, как показывают алгоритмы, основанные на асимптотических решениях, может приводить и к ослаблению, и к увеличению затухания звуковых мод. Кроме этого, измерения характеристик звукового поля с помощью микрофонов, установленных заподлицо стенок канала установок типа «Интерферометр с потоком», предназначенных для извлечения импеданса ЗПК в зависимости от скорости потока, показывают в спектре сигналов наличие так называемого Haystacking-эффекта. Он характерен для рассеяния звука турбулентностью только в случае, если звук в канале установки распространяется против потока, и отсутствует при распространении звука по потоку. Таким образом, рассеяние звука турбулентностью обуславливает наблюдаемое различие в результатах определения импеданса в двух указанных случаях, однако адекватные математические модели, описывающие данный эффект в указанном выше приложении, отсутствуют. Реальные каналы авиадвигателя имеют достаточно сложную плавно неоднородную геометрическую форму. Начиная с 1970-х годов для описания распространения звука в таких каналах развивались методы ВКБ-приближений. Однако для важных случаев, когда при выбранном значении импеданса облицовки в некотором сечении канала наблюдается эффект слияния звуковых мод, эти методы, опирающиеся на метод пограничного слоя, теряют глобальность описания процесса распространения звука в канале.

Учет всех указанных эффектов при поиске оптимального импеданса ЗПК становится невозможным без использования численных методов. Однако мощностей современных компьютеров не хватает для робастного решения задачи, так как в каналах реальных двигателей на каждой практически значимой частоте распространяются тысячи звуковых мод. Поэтому актуальным представляется использование симбиоза численных и аналитических методов, но для этого необходимо развивать новые математические модели распространения звука в каналах с потоком.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕХАНИКИ ЛЫЖНОГО ХОДА И МЕХАНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ*

Д. В. Паршин, В. И. Шукало, А. Е. Кубяк,
В. Е. Семянова, А. П. Чупахин

*Институт гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090, Новосибирск*

В последние десятилетия в спорте высоких достижений техническая составляющая определяет результат, и зачастую спортсмены, не имеющие инвентаря адекватного уровня, не способны конкурировать на мировой спортивной арене. В лыжных гонках множество факторов определяют успех выступления спортсмена: от одежды, погоды и его натренированности до микроструктуры скользящей поверхности лыжи.

Методы механики — это универсальный подход для решения задач как оптимизации движений спортсмена, так и качества скольжения лыжи по снегу [1]. В первой части работы был выполнен анализ видеозаписей бега элитных лыжников стилем дабл-полинг для визуализации и определения зависимости от времени углов в плечевом, локтевом суставах и угла между кистью и палкой как наиболее характерных параметров данного стиля. Обнаружена высокая повторяемость движений (от 3 до 19 %), что характеризует близкую к оптимальной цикличность движений лыжников элитного класса [4, 5]. По этим данным была построена математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений для связанных осцилляторов, в которой каждый лыжник характеризуется индивидуальным набором числовых коэффициентов.

$$\begin{aligned} \varphi_1'' + P_2^1(\varphi_1)\varphi_1' + Q_2^1(\varphi_1) &= k_1\varphi_0, \\ \varphi_2'' + P_2^2(\varphi_2)\varphi_2' + Q_2^2(\varphi_2) &= k_2\varphi_0. \end{aligned} \quad (1)$$

Показано, что соответствующие коэффициенты для мужчин и женщин различаются на порядки. Высказана гипотеза, что мужчин и женщин характеризуют разные типы колебаний (периодических движений): релаксационные для первых и гармонические для вторых. Подобного рода числовая характеристика — маркер спортсмена, четко устанавливающий его гендерную принадлежность, — была определена впервые в мировой практике.

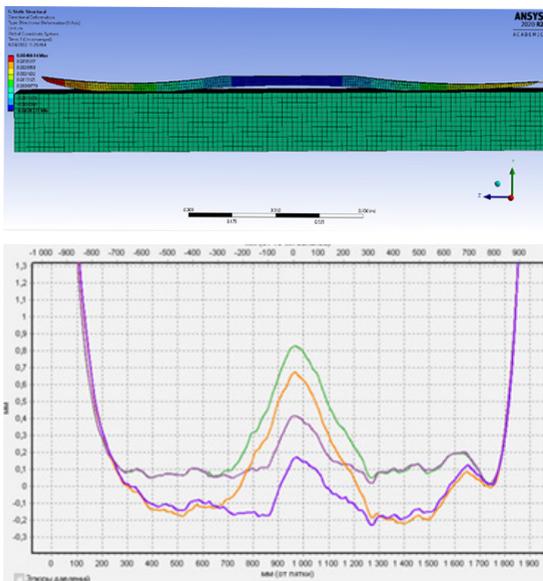
* Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (проект № 22-29-01567).

© Д. В. Паршин, В. И. Шукало, А. Е. Кубяк, В. Е. Семянова, А. П. Чупахин, 2023

Во второй части работы была решена модельная контактная задача, описывающая в упрощенной постановке движение лыжи по твердой поверхности [2, 3].

Показано, что вертикальные деформации в модельной задаче существенно отличаются от экспериментальных (см. рисунок). Предполагается, что этот эффект вызван моделью упругости, использованной для моделирования лыжи (изотропный линейный материал), что рождает необходимость дальнейшего совершенствования математической модели.

Вертикальные деформации (абсолютная величина): *сверху* — в решении модельной задачи о нагружении лыжи; *снизу* — реальная вертикальная деформация лыжи от носка к пятке при различной силе нагружения



Список литературы

1. Vähäsöyrinki P., Linnamo V. Effect of Skiing Speed on Ski and Pole Forces in Cross-Country Skiing // *Medicine Sci. Sports Exercise*. 2008. P. 1111–1116.
2. Hasler M., Jud W., Nachbauer W. Snow Temperature Behind Sliding Skis as an Indicator for Frictional Meltwater // *Front. Mech. Eng.* 2021. Vol. 7.
3. Canale L., Comtet J., Nigues A., Cohen C., Clanet C., Siria A., Bocquet L. Nanorheology of Interfacial Water during Ice Gliding // *Phys. Rev. X*. 2019. Vol. 9, № 4.
4. Holmberg H.-C., Stöggl T. Double-Poling Biomechanics of Elite Crosscountry Skiers: Flat versus Uphill Terrain // *Medicine Sci. Sports Exercise*. 2016. Vol. 48, iss. 8. P. 1580–1589.
5. Паршин Д. В., Кубяк А. Е. Об исследовании кинематики движений лыжников элитного уровня при использовании техники «Дабл полинг» // *Рос. журн. биомеханики*. 2021. Т. 25, № 3. С. 285–300.

КОНСТАНТЫ УПРУГОСТИ ДВУМЕРНЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ*

П. В. Полякова^{1,2}, Л. Х. Галияхметова², Р. Т. Мурзаев²

¹Уфимский государственный нефтяной
технический университет, 450062, Уфа

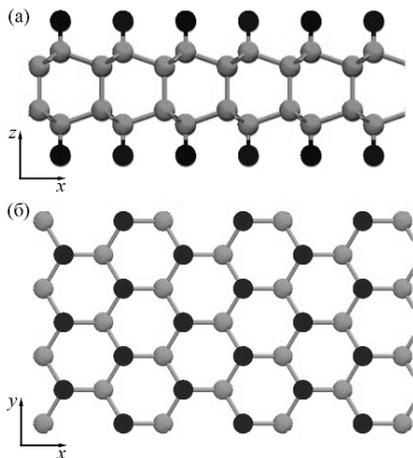
²Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 450001, Уфа

Исследование двумерных углеродных материалов — актуальная тема в последние годы, поскольку подобные структуры могут демонстрировать новые уникальные свойства. Такие материалы могут применяться в наноэлектронике благодаря электронным свойствам или для создания деталей с высокой износостойкостью, поскольку обладают высокой прочностью [1, 2]. Цель данной работы заключается в изучении констант жесткости и податливости двумерных углеродных

материалов при малых степенях деформации (до 2 %) методом молекулярной динамики.

Все расчеты произведены с использованием программного пакета LAMMPS и межатомного потенциала AIREBO [3]. В системе поддерживается постоянство температуры 0 К с помощью термостата Носе — Хувера. Расчеты выполнены с использованием NVT-ансамбля, периодические граничные условия применяются в направлениях x , y .

На рисунке представлен пример начальной структуры диамана в двух проекциях: черным показаны атомы водорода, серым — углерода (изображена часть структу-



Начальная структура диамана в двух проекциях: a — ось xz ; b — ось xy . Черным показаны атомы водорода, серым — углерода

* Исследование выполнено в рамках гранта Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых. Р. Т. Мурзаев благодарит за возможность участия в госзадании молодежной лаборатории ИПСМ РАН.

© П. В. Полякова, Л. Х. Галияхметова, Р. Т. Мурзаев, 2023

ры). Структуры изначально подвергались релаксации при 0 К, в результате чего были найдены конфигурации с минимальной потенциальной энергией. Затем проводилось растяжение вдоль оси x и в плоскости xu .

В результате проведенного моделирования на основании закона Гука были получены константы жесткости и податливости для двумерных углеродных материалов, построены кривые «напряжение — деформация» в процессе одноосного растяжения.

Список литературы

1. Wu Y. C., Shao J. L., Zheng Z. Q., Zhan H. F. Mechanical properties of a single-layer diamane under tension and bending // J. Phys. Chem. C. 2021. Vol. 125. P. 915–922.
2. Chernozatonskii L. A., Sorokin P. B., Kvashnin A. G., Kvashnin D. G. Diamond-Like C₂H Nanolayer, Diamane: Simulation of the Structure and Properties // JETP Letters. 2010. Vol. 90. P. 134–138.
3. Stuart S. J., Tutein A. B., Harrison J. A. A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions // J. Chem. Phys. 2000. Vol. 112. P. 6472–6486.

ШАБЛОНЫ ПОВЕДЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ВЗВЕШЕННЫХ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ, В МИКРОКАНАЛАХ С ПОРИСТОЙ СТЕНКОЙ*

Р. Р. Пономарёв, И. И. Ольберг, В. С. Шелистов, Е. А. Демёхин

*Финансовый университет при Правительстве РФ
(Краснодарский филиал), 350051, Краснодар*

Появление технологической возможности создавать искусственные каналы шириной в десятки микрометров и меньше привело к всплеску интереса к механике движения жидкости в системах таких каналов и породило новую научную дисциплину — микрофлюидику. Возможности микрофлюидных устройств демонстрировались в экспериментах еще два десятилетия назад. Так, группа ученых под руководством Ч. Хана сумела предложить конфигурацию, основанную на состыкованных микро- и наноканале, в которой удалось локально повысить концентрацию аналита в буферном растворе на шесть порядков [1]. В дальнейшем это явление получило название суперконцентрация. Более десятилетия этот результат оставался неповторенным, а теоретическое объяснение данного эффекта было очень общим и не указывало на характер влияния конкретных свойств системы на степень концентрирования. Развитие теории сдерживалось тем, что для удовлетворительного описания движения жидкости требовалось учесть вклад диффузии, конвективного переноса и электростатического воздействия.

Одну из первых попыток теоретического обоснования результата приняли авторы работы [2]. Они применили метод Кармана — Польгаузена из классической теории пограничного слоя и свели вышеуказанную систему уравнений к единственному нелинейному дифференциальному уравнению, которое удалось решить численно. При этом в их модели был упущен ряд физических эффектов, в том числе формирование повышенного электрического заряда на стыке микро- и наноканала. Относительно недавно появилась работа [3], использующая технику прямого численного моделирования и проливающая свет на некоторые физические механизмы обнаруженного явления, но и ее выводы нельзя назвать исчерпывающими в контексте проблемы теоретического описания суперконцентрации. В частности, авторы выполнили расчеты для случая, когда заряд аналита слабо отличается от заряда ионов в буферном растворе, что на практике выполняется нечасто.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 22-29-00307).

© Р. Р. Пономарёв, И. И. Ольберг, В. С. Шелистов, Е. А. Демёхин, 2023

В настоящей работе предлагается модель, не требующая жестких ограничений свойств аналита. За основу принята конфигурация, являющаяся упрощением одной из рассмотренных в [4], — двумерный микроканал с заряженными стенками, перекрывающийся пористой поверхностью. Наличие системы нанопор делает эту конфигурацию похожей на предложенную в [3]. Раствор с взвешенными частицами аналита предполагается сплошной средой — тернарным электролитом, в котором два сорта ионов соответствуют буферному раствору электролита, а третий сорт описывает аналит. Система уравнений Нернста — Планка — Пуассона — Стокса решается численно без дополнительных упрощений конечноразностным методом, аналогичным предложенному в [5].

На основе предложенной модели описываются физические механизмы поведения частиц аналита вблизи стыка микро- и наноканалов. Расчеты показывают качественное соответствие результатам, полученным в [3], при этом модель позволяет рассматривать частицы с относительно большим зарядом и произвольной мобильностью. В докладе перечисляются характерные режимы движения раствора и шаблоны концентрирования аналита.

Список литературы

1. Wang Y.-C., Stevens A. L., Han J. Million-fold preconcentration of proteins and peptides by nanofluidic filter // *Anal. Chem.* 2005. Vol. 77, № 14. P. 4293–4299.
2. Mani A., Zangle T.A., Santiago J.G. On the propagation of concentration polarization from microchannel-nanochannel interfaces. Part I. Analytical model and characteristic analysis // *Langmuir*. 2009. Vol. 25, № 6. P. 3898–3908.
3. Wei O., Ye X., Li Z., Han J. Deciphering ion concentration polarization-based electrokinetic molecular concentration at the micro-nanofluidic interface: theoretical limits and scaling laws // *Nanoscale*. 2018. Vol. 10, № 32. P. 15187–15194.
4. Han W., Chen X. A review: applications of ion transport in micro-nanofluidic systems based on ion concentration polarization // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2020. Vol. 95, № 6. P. 1622–1631.
5. Demekhin E.A., Nikitin N.V., Shelistov V.S. Direct numerical simulation of electrokinetic instability and transition to chaotic motion // *Phys. Fluids*. 2013. Vol. 25, № 12. 122001.

СТАНЦИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ НА ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦКП СКИФ*

И. А. Рубцов¹, А. В. Бухтияров¹, Я. В. Зубавичус¹,
А. О. Кашкаров², А. Ю. Коновалова¹, К. Э. Купер¹,
Э. Р. Прууэл², А. А. Студенников¹, К. А. Тен²,
Б. П. Толочко⁴, В. П. Халеменчук², Л. И. Шехтман³

¹ЦКП «СКИФ» Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН,
630559, наукоград Кольцово (Новосиб. обл.)

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

³Институт ядерной физики
им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090, Новосибирск

⁴Институт химии твердого тела
и механохимии СО РАН, 630090, Новосибирск

В рамках реализации проекта ЦКП СКИФ предполагается строительство 30 экспериментальных станций, одной из которых является Станция 1-3 «Быстропротекающие процессы», сдача которой ожидается в 2024 году.

В качестве источника синхротронного излучения на Станции будет установлен сверхпроводящий вигглер с энергией фотонов до ~70 кэВ. Используемое экспериментальное оборудование позволит исследовать свойства энергетических материалов, структуру ударного и детонационного фронта, фазовые переходы при ударном сжатии, быстрые химические реакции, динамическое формирование наноструктур, скоростное деформирование и разрушение материалов, воздействие высокой температуры и плазмы на материалы и другие явления, время протекания которых составляет десятки нано- и микросекунд.

Для реализации поставленных научных задач будут использоваться следующие экспериментальные методики: малоугловое рентгеновское рассеяние и дифракция с высоким временным разрешением, а также скоростная радиография. Все методики являются методиками *in situ* и *operando*. Минимальный интервал между кадрами будет составлять до 2,8 нс, а экспозиция порядка 50 пс.

* Работа была выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ для ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН.

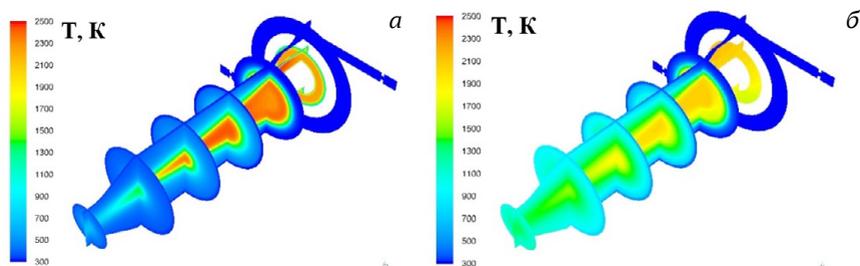
© И. А. Рубцов, А. В. Бухтияров, Я. В. Зубавичус, А. О. Кашкаров, А. Ю. Коновалова, К. Э. Купер, Э. Р. Прууэл, А. А. Студенников, К. А. Тен, Б. П. Толочко, В. П. Халеменчук, Л. И. Шехтман, 2023

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКОВ С НАЧАЛЬНОЙ ЗАКРУТКОЙ

А. В. Рудинский, В. Ю. Александров, А. А. Остроухов,
А. В. Кравченко, М. В. Ананян

Центральный институт авиационного моторостроения
им. П. И. Баранова, 111116, Москва

В настоящей работе были проведены расчеты горения газообразного метана в воздушном потоке в модельной камере сгорания при варьировании коэффициента избытка окислителя в диапазоне от 0,5 до 1,5. Моделирование течения с начальной закруткой при взаимодействии двух предварительно перемешанных потоков основывалось на решении системы уравнений сохранения массы, импульса, энергии и уравнений переноса, дополненном уравнением состояния совершенного газа и моделью турбулентности Reynolds Stress. Конечно-объемная модель содержала около 400 000 ячеек. Горение метана в воздушном потоке рассматривалось как одна брутто-реакция со скоростью химического преобразования, определяемой моделью Eddy Dissipation Concept [1]. При сравнительных расчетах установлено, что применение модели турбулентности Reynolds Stress [2] позволяет получить эффект низкотемпературного слоя вблизи стенки при сохранении высокой температуры в ядре потока (см. рисунок). При расчетах с использованием моделей турбулентности $k-\varepsilon$ [3], $k-\omega$ [4] и Transition SST [5] описанный выше эффект не достигался.



Распределение статической температуры:

а — модель турбулентности Reynolds Stress; б — модель турбулентности $k-\varepsilon$

© А. В. Рудинский, В. Ю. Александров, А. А. Остроухов, А. В. Кравченко,
М. В. Ананян, 2023

В исследуемом диапазоне по коэффициенту избытка окислителя (0,5...1,5) при использовании модели турбулентности Reynolds Stress наблюдался низкотемпературный пристеночный слой по всей длине канала. Максимальная температура вблизи стенки тракта составила 500 К.

Список литературы

1. Magnussen B.F. On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow // Nineteenth AIAA Meeting. St. Louis, 1981.
2. Launder B.E., Reece G.J., Rodi W. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure // J. Fluid Mech. 1975. № 68. P. 537–566.
3. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. L.: Academic Press, 1972.
4. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries. Inc. La Canada, California, 1998.
5. Menter F.R., Langtry R.B., Likki S.R., Suzen Y.B., Huang P.G., Volker S. A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables: Part I — Model Formulation // ASME-GT2004-53452. 2004.

РАЗРАБОТКА ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ФИДСТОКА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ*

А. И. Сагун

*Институт физики прочности
и материаловедения СО РАН, 634055, Томск*

В настоящее время аддитивные технологии успешно применяются в промышленности. Основное достоинство методов аддитивного производства — возможность изготовления изделий сложной формы за короткое время. Однако основными препятствиями для внедрения 3D-печати в промышленности являются высокая стоимость оборудования и ограничения, связанные с используемыми для печати материалами [1]. Один из наиболее дешевых и простых способов печати — метод послойного наложения, или FDM (*Fused Deposition Modeling*). FDM-печать производится термопластичными материалами (фидстоками), состоящими из наполнителя и полимерного связующего, которое позже удаляется в процессе дебайндинга (от англ. *debinding*). Этот процесс является одним из самых ответственных этапов производства изделия, так как неправильно подобранный режим дебайндинга может привести к короблению и растрескиванию изделий. Самый распространенный способ дебайндинга — термическое удаление связки. Зачастую используется комбинированный способ, когда один полимер удаляется путем растворения, а другой — в процессе обжига. Основные проблемы при FDM-печати керамикой заключаются в низкой текучести высоконаполненных термопластичных композиций и высокой пористости спеченных изделий. Для их решения предлагается использовать бимодальные порошки, состоящие из микро- и наночастиц оксида алюминия [2]. Наличие наночастиц, находящихся в свободных промежутках между микрочастицами, повышает наполненность керамо-полимерных композиций и, как следствие, плотность конечного изделия. Другой эффект — повышение текучести композиции из-за активации межчастичного проскальзывания за счет наночастиц. На первом этапе работы нами был приготовлен фидсток из наноразмерного оксида алюминия (Al_2O_3), полученного методом электрического взрыва проводника. Также в качестве исходных материалов были исполь-

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0007.

© А. И. Сагун, 2023

зованы РММА (полиметилметакрилат), PEG (полиэтиленгликоль) и Loxiol G20. Компонентный состав фидстока приведен в таблице.

Фидсток PPA1	Компонентный состав			
	Al ₂ O ₃	PEG	PMMA	Loxiol G20
Плотность, г/см ³	3,95	1,15	1,18	0,94
Массовая доля, % мас.	80,00	15,75	2,85	1,40
Объемная доля, % об.	54,10	36,19	6,09	3,62

В качестве ПАВ использовался Loxiol G20. Сначала он растворялся в петролейном эфире, затем в раствор добавлялся оксид алюминия, и раствор с порошком подвергался воздействию УЗ в течение 30 мин. Полученная суспензия фильтровалась через бумажный фильтр с многократным промыванием эфиром для удаления неадсорбированного ПАВ. Полученный оксид алюминия был помещен в сушильный шкаф для удаления оставшегося растворителя.

РММА растворяли в ацетоне. В полученный раствор был добавлен подготовленный порошок Al₂O₃. Гомогенизация раствора производилась с помощью пропеллерной мешалки. Гомогенная смесь выливалась на фольгу и сушилась в шкафу при температуре 60 °С. Высушенная смесь была смешана с PEG в шнековом экструдере. Экструзия проводилась через сопло диаметром 0,8 мм при температуре 140 °С. Полученный фидсток был раздроблен на гранулы.

Из фидстока были напечатаны образцы в виде балочек. Далее был произведен растворный дебайндинг в воде для удаления РММА. PEG был удален в результате обжига изделий в электрической печи. Максимальная температура нагрева — 1100 °С. Далее было проведено окончательное спекание изделий при температуре 1600 °С. После спекания образцы потрескались.

Была исследована усадка образцов после процессов дебайндинга и спекания образцов. В результате растворного дебайндинга усадка не наблюдалась, однако с увеличением времени процесса увеличивалось количество удаленного РММА. Общая линейная усадка после спекания составила около 15 %.

Список литературы

1. Zhangwei C. 3D printing of ceramics: A review // J. Eur. Ceram. Soc. 2019. Vol. 39. P. 661–687.
2. Oh J.W. Influence of nano powder on rheological behavior of bimodal feedstock in powder injection molding // Powder Technol. 2017. Vol. 311. P. 18–24.

ДВИЖЕНИЕ НАНОКЛАСТЕРОВ НЕФТИ В КАПИЛЛЯРЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Р. Ф. Сафаргалиев, Ю. В. Пахаруков, Ф. К. Шабиев

Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень

Процесс фильтрации является важнейшей частью движения жидкости в пористо-капиллярной среде не только в технологиях нефтедобычи, но и при работе энергетических установок. В работе приведен анализ влияния толщины пленки и размера неоднородности поверхности капилляров на смену режимов течения и явлений, связанных с ними.

Движение капли в капиллярах определяется не только силами, описываемыми капиллярным числом, но и величиной расклинивающего давления [1–3].

Рассмотрим движение капли жидкости (нефть) в цилиндрическом капилляре, заполненном несмешивающейся жидкостью (вода).

Введем цилиндрическую систему координат. Ось x направим по оси капилляра, начало координат свяжем с центром капли. Будем считать, что продольный размер капли больше радиуса капилляра (a). В таком представлении задачу капиллярной системы можно моделировать уравнением Навье — Стокса в рамках теории смазки [2].

Для случая неподвижной капли ($A(t) = 0$) можно получить уравнение, описывающее изменение толщины пленки в приближении $h/a \ll 1$ [2].

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\sigma}{3\mu_2} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ h^3 \left[\frac{\partial^3 h}{\partial x^3} + \left(\frac{1}{a^2} + \frac{\partial P(h)}{\sigma \partial x} \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right] \right\}, \quad (1)$$

где σ — поверхностное натяжение; P — расклинивающее давление.

Для анализа устойчивости этого уравнения необходимо понять временную зависимость толщины пленки [3].

$$h = h_0 + \Delta(x, t), \quad \Delta \ll h, \quad (2)$$

где $\Delta(x, t) = e^{\lambda t + i\alpha x}$.

В результате подстановки получим [2, 3]

$$\lambda = -\frac{\sigma h_0^3}{3\mu_1} \left[\omega^4 - \omega^2 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{P'(h_0)}{\sigma} \right) \right]. \quad (3)$$

Возмущение будет нарастать при $\lambda > 0$, если

$$\left(\frac{1}{a^2} + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\sigma} \right) > \omega^2. \quad (4)$$

Частота колебаний поверхности капли связана с ее длиной (1), поэтому условие неустойчивости может быть усилено соотношением

$$\frac{\partial p}{\partial x} > -\frac{\sigma}{a^2} \frac{\partial}{\partial x} > \frac{1}{l}. \quad (5)$$

Для оценки можно считать справедливым

$$\frac{\partial}{\partial x} > \frac{1}{l}. \quad (6)$$

В результате можно получить размер капли, с которого капля начнет вытягиваться и диспергироваться

$$l \approx \frac{p(h)a^2}{\sigma}. \quad (7)$$

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что эволюция капиллярной системы определяется расклинивающим давлением наряду с капиллярным числом. Следовательно, детализацию влияния скорости течения жидкости, стенок капилляров и пустотного пространства на процесс фильтрации можно осуществить через анализ расклинивающего давления и выделение роли капиллярного числа.

Список литературы

1. Мирзаджанзаде А. Х. Моделирование процессов нефтегазодобычи: нелинейность, неравновесность, неопределенность. М.: Ин-т компьютерных исследований, 2005.
2. Калинин В. В. Влияние поверхностных сил на гидродинамику растекания капля и капиллярные течения: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук (специальность 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»). М., 2002.
3. Le D. K., Pham K. H., Le P. T. Nguyen Design and screening of synergistic blends of SiO₂ nanoparticles and surfactants for enhanced oil recovery in high-temperature // Adv. Natural Sci.: Nanoscience Nanotechnology. 2011.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ Ni, ПОКРЫТОЙ КОМПОЗИТОМ ГРАФЕН/Ni: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ*

Л. Р. Сафина, Е. А. Рожнова, Ю. А. Баимова

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 450001, Уфа

При проектировании и производстве машин, механизмов, инструментов те или иные детали должны обладать определенными механическими характеристиками. На сегодняшний день ученые разрабатывают различные защитные, антикоррозионные, полимерные покрытия, чтобы улучшить свойства поверхностного слоя металла и защитить его от внешних воздействий. В работах [1–3] предложены способы получения и методы управления механическими свойствами композитных материалов графен/Ni. Полученные результаты показывают, что предложенная морфология композита является перспективным материалом для использования в качестве защитного покрытия поверхности различных металлов. В данной работе методом молекулярно-динамического моделирования исследуются механические свойства поверхности Ni, покрытой композитом графен/Ni.

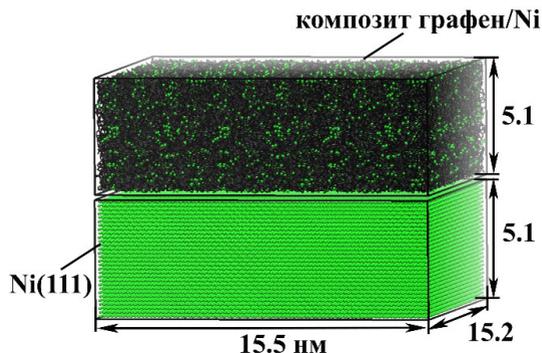
На рисунке представлена начальная структура поверхности металла, состоящей из ГЦК образца Ni(111) с размерами $15,5 \times 15,2 \times 5,1$ нм, покрытой композитом графен/Ni с такими же размерами $15,5 \times 15,2 \times 5,1$ нм. Расстояние между образцом никеля и композитом графен/Ni перед моделированием составляет 0,25 нм. Для описания межатомных взаимодействий применяются два потенциала: потенциал AIREBO для взаимодействия углерод — углерод и потенциал Морзе для описания взаимодействий углерод — никель и никель — никель. Параметры для потенциала были выбраны из предложенных в работах [4–6]. Численные эксперименты проводятся в свободно распространяемом пакете МД моделирования LAMMPS. Для оценки механических свойств поверхности никеля, покрытой композитом графен/Ni, структура подвергается одноосному растяжению при комнатной температуре.

Результаты моделирования показывают, что за счет использования прочного и в то же время пластичного композитного нанопокрyтия на основе скомканного графена и наночастиц Ni улучшаются механические свойства

* Л. Р. Сафина и Е. А. Рожнова благодарят за возможность использования гранта Республики Башкортостан РФ для молодых ученых; Ю. А. Баимова благодарит за возможность участия в госзадании молодежной лаборатории ИПСМ РАН.

© Л. Р. Сафина, Е. А. Рожнова, Ю. А. Баимова, 2023

поверхности металла. Выявлено, что композитное покрытие графен/Ni является перспективным материалом для упрочнения различных металлических деталей.



Начальная структура поверхности Ni(111), покрытой композитом графен/Ni.
Атомы Ni показаны зеленым, атомы углерода — черным

Список литературы

1. Safina L.R., Baimova J.A., Krylova K.A., Murzaev R.T., Shcherbinin S.S., Mulyukov R.R. Ni-Graphene composite obtained by pressure-temperature treatment: atomistic simulations // *Phys. Status Solidi RRL*. 2021. P. 2100429.
2. Safina L.R., Krylova K.A., Baimova J.A. Molecular dynamics study of the mechanical properties and deformation behavior of graphene/metal composites // *Mater. Today Phys.* 2022. Vol. 28. P. 100851.
3. Krylova K.A., Safina L.R., Shcherbinin S.A., Baimova J.A. Methodology for Molecular Dynamics Simulation of Plastic Deformation of a Nickel/Graphene Composite // *Materials*. 2022. Vol. 15(11). P. 4038.
4. Girifalco L.A., Weizer V.G. Application of the Morse potential function to cubic metals // *Phys. Rev.* 1959. Vol. 114. P. 687–690.
5. Katin K.P., Prudkovskiy V.S., Maslov M.M. Molecular dynamics simulation of nickel-coated graphene bending // *Micro Nano Lett.* 2018. Vol. 13. P. 160–164.
6. Galashev A.Y.; Katin K.P., Maslov M.M. Morse parameters for the interaction of metals with graphene and silicone // *Phys. Lett. A*. 2019. Vol. 383. P. 252–258.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПУЗЫРЬКОВОЙ СТРУИ: СТАРШИЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОМЕНТЫ СКОРОСТИ*

А. С. Северин^{1,2}, Б. Б. Илюшин¹, К. С. Первунин³

¹Институт теплофизики

им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Новосибирск

²Новосибирский государственный
университет, 630090, Новосибирск

³Department of Chemical Engineering,
Imperial College London, SW7 2AZ, London

Сдвиговые одно- и двухфазные течения представляют большой научный интерес, поскольку часто встречаются в природе и имеют множество промышленных применений. Несмотря на большой объем экспериментальных данных по сдвиговым течениям, доступных в литературе, включая результаты PIV-измерений [1, 2], информация о распределениях различных статистических характеристик скорости высшего порядка (например, коэффициенты асимметрии и эксцесса) получена в основном для однофазных течений. Для двухфазных потоков такая информация практически отсутствует в открытых источниках из-за высокой сложности их вычисления, обусловленной высокой чувствительностью к ошибочным измерениям («выбросам»), даже если общее число таких «выбросов» незначительно в общей статистике.

В данной работе анализируется турбулентная структура свободной пузырьковой струи на основе распределений старших статистических моментов скорости жидкости. Для их корректного расчета к массиву мгновенных полей скорости был применен метод статистической фильтрации векторов [3]. По отфильтрованным данным были рассчитаны коэффициенты асимметрии S_u и эксцесса E_u (рис. 1) при разных объемных газосодержаниях ($0\% \leq \beta \leq 3\%$). Кроме того, были вычислены энергетические спектры турбулентных флуктуаций скорости для различных β (рис. 2). В сечении $z/D = 0,5$ обнаружен характерный пик при $St \approx 2$, связанный с регулярными прохождением когерентных структур в слое смещения (рис. 2, а). Вниз по течению пик расширяется, а его амплитуда заметно падает. Это происходит из-за потери когерентности этих вихревых структур. В случае двух-

* Исследование выполнено в рамках государственного контракта ИТ СО РАН.
© А. С. Северин, Б. Б. Илюшин, К. С. Первунин, 2023

фазной струи данный пик отсутствует (рис. 2, б), что говорит о подавлении когерентных структур пузырями.

Статистический анализ ансамблей полей мгновенной скорости в комбинации с методом статистической фильтрации векторов позволил получить распределения асимметрии и эксцесса скорости жидкости в свободной одно- и двухфазной струе. Были обнаружены изменения в полях этих характеристик в зависимости от объемного газосодержания. Показано, что ярко выраженный пик в энергетическом спектре в ближней области струи при $\beta = 0\%$, связанный с прохождением когерентных структур, подавляется пузырями в случае двухфазной струи.

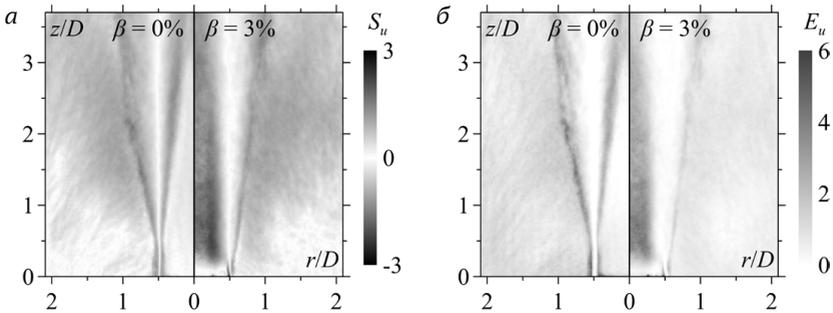


Рис. 1. Поля коэффициентов асимметрии S_u (а) и эксцесса E_u (б) для продольной компоненты скорости жидкости при разных β

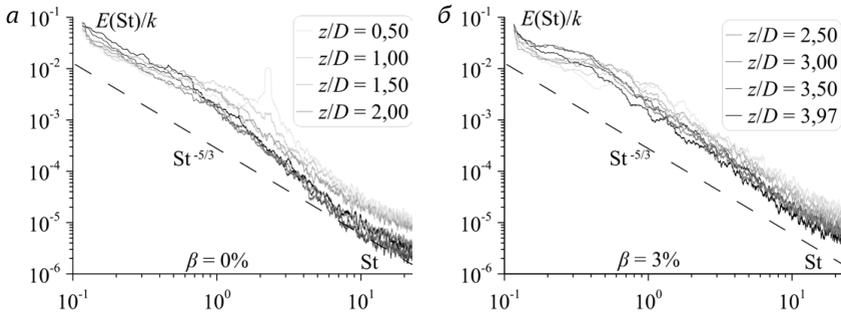


Рис. 2. Энергетические спектры турбулентных флуктуаций скорости жидкости вдоль сечения $r/D = 0,5$ для $\beta = 0\%$ (а) и для $\beta = 3\%$ (б)

Список литературы

1. Alekseenko S. V., Dulin V. M., Markovich D. M., Pervunin K. S. Experimental investigation of turbulence modification in bubbly axisymmetric jets // J. Eng. Thermophys. 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 // J. Phys: Conf. Series. IOP Publishing. 2016. Vol. 754, iss. 3. Art. 032016.
3. Heinz O. M., Ilyushin B. B., Markovich D. M. Application of a PDF method for the statistical processing of experimental data // Int. J. Heat Fluid Flow. 2004. Vol. 25, iss. 5. P. 864–874.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ВТ6 — SiC DMD-МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ*

Н. А. Сибирякова, А. А. Гольшев

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

На данный момент аддитивные технологии являются одной из самых быстроразвивающихся сфер [1]. С каждым годом появляется все больше различных методов и материалов для аддитивного выращивания. Ученые уже научились работать с гомогенными материалами, например с чистым металлом. Но если добавить вторую фазу (допустим, керамику), то материал уже становится гетерогенным, что значительно усложняет работу с ним [2]. Целью работы является создание металлокерамического покрытия ВТ6 – SiC методом аддитивного выращивания и поиск обобщающих закономерностей процессов, протекающих при 3D-печати.

Исследуется метод лазерной наплавки DMD (*direct metal deposition*). Он заключается в подаче наплавляемой порошковой смеси через коаксиальное сопло в ванну расплава, образованную лазерным излучением.

В ходе экспериментов проводилась наплавка порошковой смеси титанового сплава ВТ6 и карбида кремния (SiC) с различной концентрацией керамики: 0, 10, 20 % по массе. Проведена оптимизация единичных треков, определены безразмерные энергетический [3] и динамический параметры, определяющие результат наплавки. Приведена теория для усреднения теплофизических констант (теплопроводность, плотность, теплоемкость) композитного материала [4]. Показано, что безразмерные геометрические параметры треков линейно зависят от безразмерного энергетического параметра независимо от концентрации керамики в порошковой смеси. Получено многослойное металлокерамическое покрытие без дефектов. Показано, что полученное покрытие имеет микротвердость в 1,7 раза ($600\text{HV}_{0,3}$) выше по сравнению с титановой подложкой.

Список литературы

1. Фомин В. М., Гольшев А. А., Маликов А. Г., Оришич А. М., Филиппов А. А. Создание функционально-градиентного материала методом аддитивного лазерного

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (№ 21-79-10213).

© Н. А. Сибирякова, А. А. Гольшев, 2023

сплавления // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61, № 5 (363). С. 224–234.

2. Фомин В. М., Гольшев А. А., Косарев В. Ф., Маликов А. Г., Оришич А. М., Филиппов А. А. Создание металлокерамических структур на основе Ti, Ni, WC и B₄C с применением технологии лазерной наплавки и холодного газодинамического напыления // Физ. мезомеханика. 2019. Т. 22, № 4. С. 5–15.

3. Weaver J. S., Heigel J. C., Lane B. M. Laser spot size and scaling laws for laser beam additive manufacturing // J. Manuf. Proc. 2022. Vol. 73. P. 26–39.

4. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / пер. с фр. М.: Мир, 1968.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА ДЛЯ УДАРНОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ

Р. С. Сидоров, М. А. Ильченко

*Центральный институт авиационного моторостроения
им. П. И. Баранова, 111116, Москва*

В аэрофизических экспериментах параметры проходящих вдоль стенок ударных или детонационных волн определяются, как правило, при помощи датчиков пульсаций давления. При измерениях в высокотемпературном потоке датчики соединяются со стенками с помощью волновода с длинной приемной части (от одного до нескольких метров), чтобы исключить их контакт с горячим газом. После прохождения ударной или детонационной волны в месте отбора давления по волноводу распространяется затухающая ударная волна, которая на некоторой длине вырождается в акустическую. Поэтому длина и диаметр приемной части волновода должны быть подобраны таким образом, чтобы ударный фронт сохранялся вплоть до его регистрации датчиком. При этом, как показало проведенное исследование, ударные волны затухают гораздо сильнее акустических.

В данной работе произведено численное исследование газодинамических и тепловых процессов в волноводe при его заполнении продуктами сгорания и периодическом прохождении по нему ударных волн. В исследовании было применено граничное условие с периодической временной зависимостью полного давления, которое допускает знакопеременный расход.

Экспериментальное исследование затухания одиночных ударных волн проводилось при помощи ударной трубы. Применялись датчики пульсаций давления как с волноводами диаметром 4 мм, так и без них. Полученные данные использовались также для валидации численного метода.

Показано, что снижение температуры газа до начальной температуры стенок волновода происходит на длине порядка 50 калибров. Продемонстрировано удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных для одиночных ударных волн. Произведено исследование затухания ударных волн, проходящих с разной частотой. Получена зависимость амплитуды колебаний давления от длины канала. Так, на расстоянии 1 м от места отбора давления амплитуда пульсаций частотой 2 кГц уменьшается приблизительно в 20 раз. Полученные зависимости позволяют по показаниям датчика пульсаций давления производить оценки амплитуды ударных волн в камере, в том числе в высокотемпературном потоке.

© Р. С. Сидоров, М. А. Ильченко, 2023

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИ ПОДОБНОЙ СВОБОДНОЛЕТАЮЩЕЙ МОДЕЛИ САМОЛЕТА*

В. Д. Скворцова, А. М. Гильманов, В. Ю. Зайцев,
В. А. Мыррин, М. Г. Никитин, В. И. Петошин

*Сибирский научно-исследовательский институт авиации
им. С. А. Чаплыгина, 630051, Новосибирск*

Основным методом определения аэродинамических характеристик летательных аппаратов (ЛА) являются испытания с помощью масштабных моделей в аэродинамических трубах и численное моделирование. Однако в ряде случаев необходимы и летные эксперименты. Летные исследования на летающих моделях актуальны, когда требуемые режимы невозможно обеспечить в аэродинамической трубе, а проведение эксперимента на пилотируемом аппарате слишком сложно или не обеспечивает необходимой безопасности для экипажа [1].

Создание динамически подобной свободнолетающей модели (ДПЛМ) предусмотрено в плане работ по созданию беспилотного демонстратора с активным обдувом несущих поверхностей. ДПЛМ предназначена для следующих задач: отработки рациональной траектории и методов пилотирования на взлете и посадке; оценки эффективности мер повышения устойчивости и управляемости на больших углах атаки; отработки структуры и законов системы автоматической стабилизации (управления).

Подобие движения по траектории модели и полноразмерного самолета обеспечивается подобием всех безразмерных характеристик этого движения. Однако на практике выполнение всех критериев подобия недостижимо, откуда возникает необходимость оценить величину погрешности (масштабный эффект) и выделить минимальный набор критериев подобия движения, обеспечивающий требуемую точность.

Для модели не учитываются такие факторы, как сжимаемость воздуха, аэродинамический нагрев модели, турбулентность атмосферы, аэроупругие колебания и т. д. При использовании активного обдува крыла с отклоненными закрылками влияние числа Рейнольдса на аэродинамические характеристики невелико. Поэтому для упрощения принято считать, что аэроди-

* Авторы выражают особую благодарность А. Б. Глинскому за оказанную помощь в проведении работы.

© В. Д. Скворцова, А. М. Гильманов, В. Ю. Зайцев, В. А. Мыррин, М. Г. Никитин, В. И. Петошин, 2023

намические характеристики зависят только от угла атаки α и коэффициента нагрузки на ометаемую винтом площадь — B .

Окончательно для ДПЛМ были выбраны следующие наиболее значимые критерии подобия и безразмерные коэффициенты:

$$\bar{\mu} = \frac{2m}{\rho(H)Sb_a} \text{ — коэффициент относительной плотности ЛА;}$$

$$\bar{P} = \frac{P(H, V)}{mg} \text{ — тяговооруженность;}$$

$$i_{x,y,z} = \frac{I_{x,y,z}}{mb_a^2} \text{ — безразмерный момент инерции;}$$

$$\bar{V} = \frac{V}{\sqrt{gl}} \text{ — безразмерная скорость;}$$

δ — угол отклонения аэродинамических рулей;

α — угол атаки;

$$\bar{\omega}_z = \omega_z \sqrt{\frac{l}{g}} \text{ — безразмерная угловая скорость;}$$

$$\tau = \frac{2m}{\rho SV} \text{ — масштаб времени.}$$

Исходя из выбранных критериев, исходных параметров натурального самолета [2], соображений удобства постановки летного эксперимента, а также доступности компонентов малоразмерных ВМГ, масштаб ДПЛМ был принят равным $1 : 10$ ($K = 1 \cdot 10^{-1}$).

После определения основных параметров ДПЛМ была разработана конструкция, оснастка, электрическая схема. Выбраны и получены покупные комплектующие (ЭД, аккумуляторы и т. д.). Экспериментально определены характеристики ВМГ РСУ и МСУ модели — зависимости тяги, тока, мощности от оборотов.

Список литературы

1. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. Изд. 8-е, перераб. М.: Наука, 1977. 440 с.

2. Серьезнов А. Н., Чемезов В. Л., Кучумов Г. Т., Смирнов Д. Н. Научно-технический отчет о реализации проекта «Разработка и летные испытания демонстраторов транспортного беспилотного летательного аппарата сверхкороткого взлета и посадки с гибридной силовой установкой и активным обдувом несущих поверхностей по теме: Определение эффективных методов повышения взлетно-посадочных характеристик. Эскизное проектирование демонстратора». Глава 11. Формирование окончательного облика демонстратора. Новосибирск, 2021. 1508 с.

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ ПРЯМОГО КРЫЛА НА ЗАКРИТИЧЕСКИХ УГЛАХ АТАКИ

Ю. С. Суворова, А. А. Корняков, В. Г. Судаков, А. С. Щеглов

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)*

В работе проведены расчетные исследования обтекания модели прямого крыла с профилем NASA 0018 и представлено сравнение полученных данных с экспериментами [1]. Хорда профиля составляла $c = 0,242$ м, размах — 1,21 м. Параметры расчета соответствовали экспериментам [1]: рассматривались режимы со скоростью набегающего потока 40 м/с и углами атаки в диапазоне $\alpha = 0-34^\circ$, число Рейнольдса, посчитанное по хорде профиля, составляло $Re = 0,67$ млн.

В работе решались уравнения Рейнольдса в стационарной (RANS) и нестационарной (URANS) постановках с замыканием системы уравнений с помощью модели турбулентности SST. Расчеты проведены для двумерной (профиль) и трехмерной (модель прямого крыла) постановки как для случая с турбулентным пограничным слоем сразу с передней кромки профиля, так и для случая с ламинарно-турбулентным переходом (так как экспериментальные данные были получены со свободным переходом [1]). Переход моделировался с помощью γ -модели [2].

Дополнительно был выполнен расчет в рамках DDES (*Delayed DES* [3]) подхода на закритическом угле атаки 30° . Эти расчеты позволили определить трехмерные вихревые структуры в следе за крылом.

Проведено сравнение аэродинамических характеристик модели, полученных в эксперименте и в расчете с помощью различных подходов. Это позволило определить границы применимости и пределы точности каждого метода, выделить особенности.

Список литературы

1. Жук А. Н., Колинько К. А., Миатов О. Л., Храбров А. Н. Экспериментальные исследования нестационарных аэродинамических характеристик изолированных крыльев в условиях срыва потока // Препринт ЦАГИ. 1997. № 86.
2. Menter F. R., Smirnov P. E., Liu T., Avancha R. A one-equation local correlation-based transition model // Flow Turbulence Combustion. 2015. № 95. P. 583-619.
3. Gritskevich M. S., Garbaruk A. V., Schütze J., Menter F. R. Development of DDES and IDDES Formulations for the $k-\omega$ Shear Stress Transport Model // J. Flow Turbulence Combustion. 2012. Vol. 88, № 3. P. 431-449.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БОРСОДЕРЖАЮЩИХ СМЕСЕЙ ЗА УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ*

А. А. Сыроватень, Д. А. Тропин

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Изучение воспламенения и горения микрочастиц бора необходимо для составления более подробного паспорта безопасности для данного материала. На множестве предприятий, использующих бор и его соединения, могут возникнуть пожаро- и взрывоопасные ситуации; их можно избежать, зная параметры, при которых происходит воспламенение и горение газозвеси бора в окислителе (кислород и водяной пар). Частицы горючих металлов имеют высокую теплоту сгорания, однако можно выделить несколько наиболее энергоемких материалов, например частицы алюминия [1], магния [2], бериллия и бора (металлоид). По теплоте сгорания микрочастиц с кислородом бор занимает лидирующие позиции.

Рассмотрена задача о взаимодействии ударной волны с газозвесью бора в окислителе. Слева направо по газозвеси проходит ударная волна, за которой происходит воспламенение газозвеси бора. Для моделирования процесса воспламенения и горения газозвеси бора в окислителе (кислород / водяной пар) разработана математическая модель, записанная в системе отсчета, связанной с фронтом ударной волны. Система состоит из 4 алгебраических уравнений для газозвеси (уравнения сохранения массы, импульса и энергии, уравнение количества частиц), уравнения для определения скорости газовой смеси, а также дополняется обыкновенными дифференциальными уравнениями для потока массы, скорости и температуры частиц. Замыкается данная система уравнений PSU-моделью горения бора [3].

Расчеты проводились для частиц диаметром 1; 7,5 и 20 мкм, толщиной оксидного слоя $x_p = 0,01 \cdot d$ при объемных концентрациях частиц $m_2 = 10^{-4}$ и $m_2 = 10^{-5}$. Также варьировалась концентрация водяного пара в кислороде (от 0 до 90 %). Получены различные структуры волн горения для ряда случаев. На рис. 1 представлен один из полученных вариантов расчета, на котором показаны параметры фазы частиц с индексом 1 и газовой фазы с индексом 2.

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 21-79-10083), <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>

© А. А. Сыроватень, Д. А. Тропин, 2023

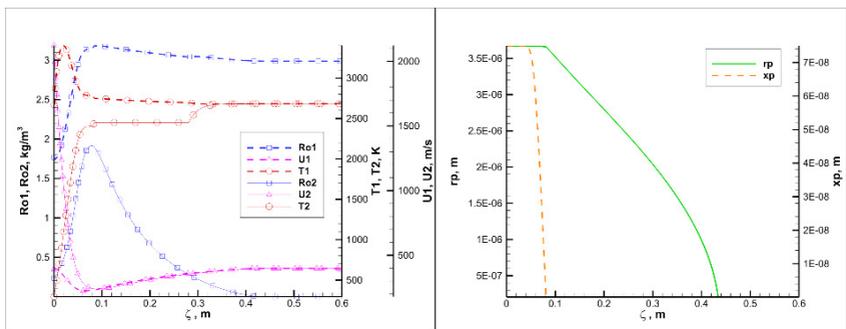
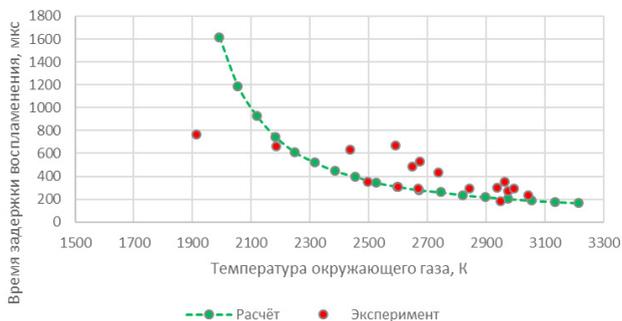


Рис. 1. Параметры газовой фазы и фазы частиц при диаметре $d = 7,5$ мкм, окислитель — кислород, объемная концентрация частиц $m_2 = 10^{-4}$

Рис. 2. Зависимость времени задержки воспламенения от температуры газа



Проведен анализ влияния диаметра частиц и концентрации водяного пара на время задержки воспламенения. На рис. 2 показано сравнение с экспериментальными данными по времени задержки воспламенения в зависимости от температуры окружающего газа и найдено согласие в пределах температур 2200–3000 К.

Список литературы

1. Хмель Т. А., Федоров А. В. Моделирование плоских волн детонации в газозвеси наноразмерных частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54, № 2. С. 71–81.
2. Fedorov A. V. and Tropin D. A. Mathematical model of magnesium ignition in an extended range of parameters // Combustion, Explosion, Shock Waves. 2008. Vol. 44, № 5. P. 552–559.
3. Yeh C. L., Kuo K. K. Ignition and Combustion of Boron Particles // Prog. Energy Combust. Sci. 1996, № 22. P. 511–541.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ С КОНЕЧНОРАЗМЕРНЫМИ ПЛАСТИНАМИ*

В. М. Темербеков, Д. А. Тропин

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Работа посвящена численному исследованию прохождения детонационной волны (ДВ) по плоскому прямоугольному каналу с установленной в нем жесткой проницаемой преградой. Расчетная область заполнялась предварительно перемешанной стехиометрической водородо-воздушной смесью при начальном давлении $P = 100$ кПа и начальной температуре $T = 300$ К. При таких начальных условиях, поперечный размер детонационной ячейки смеси оказывался равным $\lambda = 12,5$ мм. Непосредственно перед препятствиями в качестве начальных условий задавалась предварительно рассчитанная ячеистая детонационная волна. Скорость фронта ДВ составляла примерно $D_{CJ} = 1937$ м/с. Преграда представляла собой набор конечноразмерных пластин, регулярно установленных в моделируемой области. Ширина исходного канала составляла $H = 100$ мм, зазор между пластинами (l_1), их длина (l_2) и шаг их установки (l_3) варьировались. Толщина пластин составляла 2 мм.

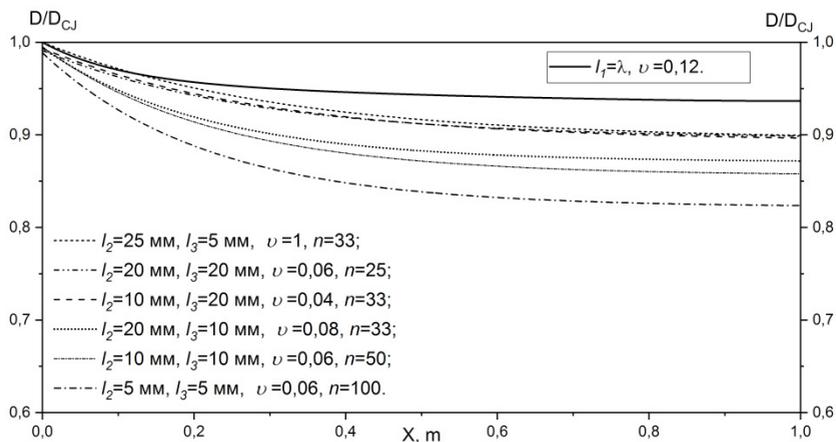
Расчеты производились в программном комплексе ANSYS Fluent. Для моделирования химической кинетики была использована приведенная кинетическая схема, которая включает в себя одну брутто-реакцию горения водорода в окислителе. Ранее данная кинетическая схема была верифицирована по экспериментальным данным о времени задержки воспламенения, скорости распространения детонационной волны и размеру детонационной ячейки при различных условиях [1].

В результате расчетов было выявлено, что использование конечноразмерных пластин позволяет значительно уменьшить скорость распространения детонационной волны (см. рисунок). Оценено влияние геометрических параметров пластин и шага их установки на скорость распространения детонации (D_{CJ}^f). Определено, что увеличение количества пластин (n) приводит к более сильному изменению скорости распространения детонации (ΔD_{CJ}^f) по сравнению с увеличением их удельного объема — v (см. таблицу). Также

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 21-79-10083), <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>

© В. М. Темербеков, Д. А. Тропин, 2023

увеличение удельного объема, занимаемого пластинами, и их количества в одном ряду, в совокупности с уменьшением зазора между пластинами, меньше геометрического предела существования детонационной ячейки, что приводит к более существенному влиянию количества рядов пластин на ослабление детонации.



Сравнение скоростей распространения ДВ для конечногабаритных пластин при $l_1 = \lambda$

Результирующие скорости распространения ДВ для конечногабаритных пластин при $l_1 = \lambda$

$l_2, \text{ мм}$	$l_3, \text{ мм}$	ν	n	$D_{CJ}^f, \text{ м/с}$	$\Delta D_{CJ}^f, \text{ м/с}$
25	5	0,1	33	1742	72
20	20	0,06	25	1740	74
10	20	0,04	33	1736	78
20	10	0,08	33	1688	126
10	10	0,06	50	1661	153
5	5	0,06	100	1595	216

Список литературы

1. Tropin D.A., Bedarev I.A. Problems of detonation wave suppression in hydrogen-air mixtures by clouds of inert particles in one- and two-dimensional formulation // Combust. Sci. Technol. 2021. Vol. 193, № 2. P. 197–210.

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕРВОПРИВОДОВ*

А. Д. Тимофеева, А. И. Стеблинкин, Е. В. Ерофеев

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)*

В авиационной промышленности широкое применение получили различные виды электрогидравлических сервоприводов. Для внедрения «модельноориентированного» подхода в процесс проектирования таких приводов необходимо создавать большое количество математических моделей разной степени детализации, применимых для решения различных задач.

В работе обобщен опыт авторов по созданию разнотипных математических моделей электрогидравлических сервоприводов с золотниковыми гидрораспределителями. Исследовано влияние учета температуры рабочей жидкости, ее сжимаемости, а также микрогамометрии золотника на результаты моделирования различных характеристик привода как статических, так и динамических, в том числе при действии внешней нагрузки, а также в пассивном (демпфирующем) режиме работы привода.

Модели без учета сжимаемости жидкости допустимо использовать в случае, если для исследований не имеет значения динамика нарастания давления в полостях гидроцилиндра: в частности при моделировании процесса управления перемещением выходного звена привода, при оценке запасов устойчивости самого привода или замкнутого контура управления с приводом, интегрированным в тракт управления.

Сжимаемость рабочей жидкости необходимо учитывать при построении моделей приводов, предназначенных для анализа процессов воспроизведения ими силы на выходном звене, в частности при моделировании силовозбудителей и испытательных стендов [1].

Особенности моделирования золотниковых гидрораспределителей заключаются в том, что в области малых входных сигналов (составляющих от 0,05 до 1 % от максимального перемещения) необходимо учитывать динамику открытия щелей ЗГР и особенности течения рабочей жидкости через них. При представлении ЗГР в упрощенном виде расход утечек считается

* В докладе представлен способ реализации разнотипных моделей различного применения в рамках единой программно-математической модели с использованием средств среды MATLAB/Simulink.

© А. Д. Тимофеева, А. И. Стеблинкин, Е. В. Ерофеев, 2023

линейно зависимым от перепада давлений на дросселе. Однако наиболее значимый расход утечек появляется в золотниках с перекрытием кромок, что обуславливает постоянный «паразитный» ток жидкости из линии напора в линию слива [2]. При моделировании с учетом микрогеометрии утечки представляются как непроемчатый расход через щели ЗГР. В результате критически важным является учет микрогеометрии при снятии модельных характеристик динамической жесткости привода.

Список литературы

1. Алексеенков А. С., Ермаков С. А., Константинов С. В., Кузнецов В. Е., Оболенский Ю. Г., Редько П. Г. Системы электрогидравлических рулевых приводов комплексов управления полетом самолетов / под ред. д-ра техн. наук, проф. С. В. Константинова. СПб.: Изд. СПбГЭ, 2019.
2. Месропян А. В., Широкова К. А. Численное моделирование характеристик струйно-золотниковых гидроусилителей // Гидропневмоавтоматика и гидропривод: сб. науч. тр. Ковров: КГТА, 2006. Т. 1. 326 с.

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФУЗИОННОГО ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ВСЛЕДСТВИЕ ЕГО СТРУКТУРИЗАЦИИ ПРИ ДИСПЕРГИРОВАНИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОКОМПОНЕНТОВ

С. А. Титов^{1,2}, В. Д. Вермель², О. И. Ганяк²,
О. Р. Ганиев³, Ю. В. Корнев⁴

¹ Центр научно-технических услуг «ЦАГИ»,
140181, г. Жуковский (Моск. обл.)

² Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)

³ Научный центр нелинейной волновой механики и технологии
РАН, 101000, Москва

⁴ Институт прикладной механики РАН, 125040, Москва

В современных условиях существенно расширяющегося внедрения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкции самолетов и вертолетов, а также других изделий машиностроения актуальным направлением совершенствования технологии изготовления является снижение стоимости и трудоемкости, которое может быть достигнуто расширением внедрения технологии инфузионной пропитки, наряду с традиционным автоклавным формованием.

К недостаткам конструкций из ПКМ относят меньшую прочность и стойкость к ударным повреждениям. Отечественный и зарубежный опыт показывает, что при посадке и взлете с плохо подготовленной полосы в зимнее время самолеты получали более 70 ударных повреждений различной величины на агрегате с размерами 6 × 0,7 м.

Предотвращение значительного числа низкоэнергетических повреждений возможно за счет существенного повышения прочности и ударной вязкости связующего в ПКМ.

На решение данной задачи направлены широкие исследования, проводимые в России и за рубежом. Одним из потенциальных эффективных направлений признана разработка наномодифицированных связующих путем диспергирования в их состав ограниченных объемов углеродных нанотрубок (УНТ). В ряде исследований, выполняемых за рубежом и в РФ, было показано, что малые объемы УНТ, диспергируемые в эпоксидное связующее,

приводят к его структуризации [1, 2]. Однако они сопровождаются повышением вязкости связующего, исключающим его применение в инфузионном процессе.

В докладе рассматривается повышение стойкости к ударным повреждениям конструкционного связующего при сохранении его вязкости, обеспечивающей пропитку тканного армирующего наполнителя в инфузионном формировании.

Также вводятся ограничения на размеры агломератов УНТ, исключаящие их фильтрацию при пропитке тканного наполнителя.

Нами показано, что наиболее эффективным способом диспергирования является ультразвуковое. Однако данная технология имеет существенные ограничения и позволяет модифицировать компаунд в небольших, лабораторных, объемах. Решением данной задачи может стать применение разработанной в НЦ НВМТ РАН технологии диспергирования, основанной на методах нелинейной волновой механики [3].

В работе представлены результаты предварительных исследований по определению возможности повышения механических характеристик, а также трещиностойкости конструкционного инфузионного связующего на основе диспергирования углеродных наночастиц.

На образцах из углепластика, изготовленных методом вакуумного формирования с применением наномодифицированного связующего, показано существенное снижение зоны повреждения при ударном воздействии. Сформулированы дальнейшие направления исследований.

Список литературы

1. Vermel V.D., Titov S.A., Kornev Yu. V., Semenov P.E., Nagovitsyna Yu. T., Chernyshev L. L. Evaluation of improving mechanical characteristics of epoxy binder after dispersing carbon nanotubes // *Adv. Mater. Technol.* 2018. № 4. P. 5–15.
2. Каблов Е. Н., Кондрашов С. В. Юрков Г. Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // *Рос. нанотехнологии.* 2013. Т. 8, № 3–4. С. 24–42.
3. Ганиев Р. Ф., Ганиев С. Р., Касилов В. П., Пустовгар А. П. Волновые технологии в инновационном машиностроении. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2014. 87 с.

ДИНАМИЧЕСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛЫХ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ АНЕВРИЗМ*

Д. В. Тихвинский, Ю. О. Куянова, А. В. Бервицкий,
Ю. А. Станкевич, Д. В. Паршин

*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Новосибирск*

Церебральные аневризмы являются широко распространенным социально значимым заболеванием. Несмотря на невысокий риск их разрыва (примерно 0,5 %) [1], они играют существенную роль в перестройке церебрального кровообращения, а также способны вызвать его острое нарушение по ишемическому или геморрагическому типу [2]. В настоящее время применяются как эндоваскулярные и микрохирургические, так и смешанные техники, особенно при лечении множественных аневризм [3]. Тем не менее важной дилеммой для хирурга является принятие решения о проведении оперативного вмешательства, особенно в случае наличия у пациента малой неразорвавшейся аневризмы.

В настоящей работе приводятся первые результаты динамического наблюдения группы пациентов с церебральными аневризмами. На протяжении нескольких лет проводились контрольные КТ-исследования, по результатам которых произведено измерение морфологических и гемодинамических параметров аневризм. Впервые качественно оценена связь указанных параметров и статуса аневризмы в рамках одного пациента.

Данные пациентов предоставлены Федеральным центром нейрохирургии города Новосибирска. КТ-ангиография выполнялась на компьютерном томографе Philips Ingenuite (*Philips Medical Systems*, США, 128 срезов). Оценка динамики размеров аневризм производилась путем измерения трех основных размеров с точностью до 0,1 мм в программной среде *IntelliSpace Portal Philips*. Анализ полученных изображений включал: определение наличия и количества аневризм, их локализацию и соотношение с костными структурами, определение размеров (диаметр купола и шейки аневризмы) и формы. Для моделирования течения крови в сосудах использовался пакет

* Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 20-71-10034).

© Д. В. Тихвинский, Ю. О. Куянова, А. В. Бервицкий, Ю. А. Станкевич, Д. В. Паршин, 2023

ANSYS CFX 2020R2. В пациент-специфических конфигурациях изучалось изменение гемодинамических параметров с течением времени.

Проанализированы данные динамического наблюдения морфологических и гидродинамических характеристик нескольких пациентов с интракраниальными аневризмами. Анализ количественных характеристик показывает, что наибольший рост рассмотренных аневризм происходит в направлении увеличения объема купола и при этом наибольшее влияние на этот рост оказывает рост средних скоростей, нежели рост величины касательных напряжений. Из этого можно сделать вывод, что трехмерная структура церебральных сосудов двух пациентов претерпела изменения таким образом, что гемодинамически провоцирует рост имеющихся аневризм. Проведенное исследование направлено на уточнение рисков критериев разрыва церебральных аневризм для российского населения.

Список литературы

1. Rinkel G. J. E. et al. Prevalence and risk of rupture of intracranial aneurism // Stroke. 1998. Vol. 29. P. 251–256.
2. Salvadori E., Papi G. et al. Comparison between Ischemic and Hemorrhagic Strokes in Functional Outcome at Discharge from an Intensive Rehabilitation Hospital // Diagnostics. 2021. Vol. 11. P. 38.
3. Andaluz N., Zuccarello M. Treatment strategies for complex intracranial aneurysms: review of a 12-year experience at the University of Cincinnati // Pub. Med. 2011 Jul. Vol. 21 (4). P. 233–42.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ УГЛЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ЗАКРУТКЕ ПОТОКА*

Р. Р. Тлеуленов, А. А. Митрофанов, К. М. Моисеева

Томский государственный университет, 634050, Томск

Горение при закрутке потока — один из вариантов перспективного сжигания газовзвесей угольной пыли. Закрутка потока создает зоны с неоднородным распределением частиц. Это может изменить полноту догорания газовзвеси и повысить эффективность работы горелочного устройства.

Была поставлена задача исследовать закономерности горения взвеси угольной пыли в метановоздушной смеси в канале с расширением при закрутке потока.

Постановка задачи основывалась на работах [1, 2], метод решения — на методе Ван Леера [3]. В расчетах варьировалась скорость подачи и коэффициент скорости закрутки газовзвеси, массовая концентрация и радиус частиц угольной пыли.

На рис. 1 представлены изолинии температуры газа для установившегося режима горения. Параметры расчета задавались равными: массовая концентрация угольной пыли — $m_k = 0,2 \text{ кг/м}^3$; радиус частиц угольной пыли — $r_k = 5 \text{ мкм}$; объемная доля метана в газе — $a_{\text{vol}} = 2 \%$; скорость подачи газовзвеси вдоль осевого направления канала — 2 м/с ; скорость подачи газа вдоль оси закрутки — $u_r = A_z u_{zb} r$, где $A_z = 50 \text{ м/с}$ — коэффициент закрутки.

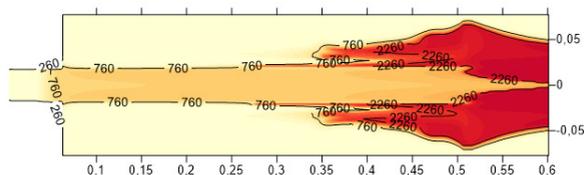


Рис. 1. Изолинии температуры

Увеличение радиуса частиц приводит к изменению формы пламени газовзвеси. На рис. 2 построены изолинии температуры газа в случае горения

* Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2020-0036).

© Р. Р. Тлеуленов, А. А. Митрофанов, К. М. Моисеева, 2023

газовеси углекислого газа с радиусом частиц 10 мкм. Фронт пламени искривлен, максимум температуры реализуется вдоль оси канала. В окрестности стенок канала возникают нагретые области из-за догорания крупных частиц.

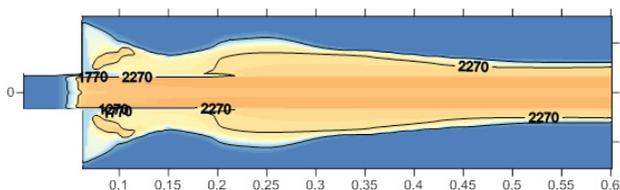


Рис. 2. Изолинии температуры

Уменьшение массовой концентрации частиц приводит к смещению фронта пламени вниз по потоку. На рис. 3 представлены результаты расчета для массовой концентрации частиц $0,1 \text{ кг/м}^3$.

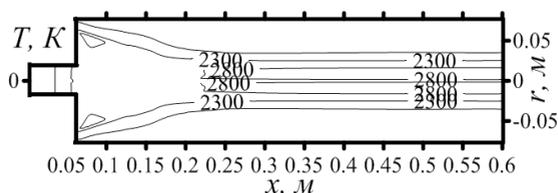


Рис. 3. Изолинии температуры

При малых массовых концентрациях угольной пыли углекислого газа смесь с крупными частицами угольной пыли горит преимущественно за счет присутствия метана в смеси. Частицы догорают вдоль канала, и фронт пламени реализуется на выходе из канала. Если коэффициент скорости закрутки мал, то расширение фронта пламени возможно за счет горения метана и нагрева частиц в окрестности боковых стенок канала. Таким образом, крупнодисперсная угольная пыль будет гореть вдоль всего канала за счет высокой инерционности и низкой скорости горения.

Список литературы

1. Тлеуленов Р.Р. Математическое моделирование задачи о распространении пламени по газовой смеси древесной пыли // Математика. Материалы 59-й Междунар. науч. студ. конф. Новосибирск, 2021. С. 116.

2. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Рожкова Е. И. Горение аэровзвеси угольной пыли в закрученном потоке // Вестн. Том. гос. ун-та. Серия: Математика и механика. 2021. № 71. С. 139–147.

3. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. second-order sequel to Godunov's method // J. Comput. Phys. 1979. Vol. 32, № 1. P. 101–136.

РАЗРАБОТКА ФИДСТОКОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ИЗ ПСЕВДОСПЛАВА W-CU*

Н. Е. Торопков

Томский государственный университет, 634050, Томск
Институт физики прочности
и материаловедения СО РАН, 634055, Томск

Введение. Несмешивающиеся сплавы представляют собой материалы с двумя или более металлическими компонентами с ограниченной взаимной растворимостью. Такие материалы представляют большой прикладной интерес для применения в различных областях машиностроения [1]. В частности, сплавы W-Cu обладают превосходными механическими и электрическими свойствами [2]. Для обеспечения желаемых свойств необходимо добиться однородности сплава. Использование бимодальных наномикропорошков для изготовления объемных изделий может решить эту проблему, поскольку более мелкие частицы порошка могут эффективно уменьшать размер кластеров W и Cu в изготавливаемых деталях без изменения химического состава и свойств. Наиболее перспективной технологией получения изделий сложной формы является технология EAM (*extrusion additive manufacturing*). Такая технология использует полимерные высоконаполненные композиты с порошковыми материалами (фидстоками).

Методика проведения работы. Для получения порошков на основе псевдосплава W-Cu использовали совместный электрический взрыв железной и медной проволоки. В работе приведены принципиальные схемы установки для получения порошков совместным электровзрывом двух проводов (ЭВП) [3]. Процесс ЭВП проводили в аргоне с последующей пассивацией на воздухе в течение 24 ч. В качестве полимерного связующего были выбраны следующие полимеры: полиамид марки LX-2040 и полиолполимер марки MC-2163 в объемном соотношении 55 : 45 (LX-2040 : MC-2163). Фидстоки получали путем смешивания полимера и порошка с помощью двухшнекового экструдера и затем гранулировали в цилиндрические гранулы. В качестве метода удаления связующего было выбрано удаление ацетона. Показатель текучести расплава (ПТР) определялся согласно ASTM D1238 и был выбран в качестве критерия для оценки текучести и формуемости. Все композиции были испытаны на экструзионном пластометре при нагрузке 50 Н и тем-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (проект № 21-79-30006).

© Н. Е. Торопков, 2023

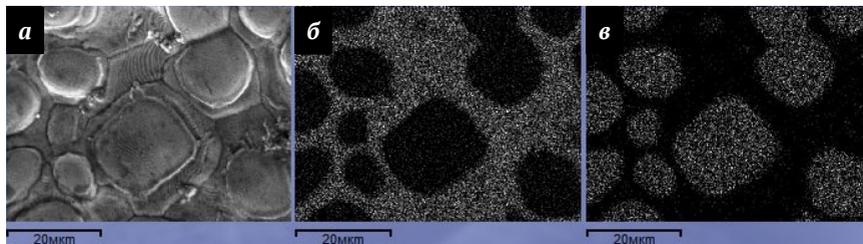
температуре 160 °С. Процесс ЕАМ осуществлялся на коммерческом принтере Prusa i3 с модернизированной печатающей головкой для работы.

Из фидстока были напечатаны образцы в виде балочек размером 10 × 10 × 100 (В × Ш × Г). Остатки связующего были удалены комплексно совместно с обжигом изделий в электрической печи в вакууме (10 Е — 5 Па). Максимальная температура нагрева — 1090 °С. Параметры полученных образцов представлены в таблице.

Параметры фидстоков W–Cu

ПТР, г / 10 мин	Температура печати, °С	Скорость печати, мм/с	Прочность «зеленой» детали, МПа	Прочность спеченной детали, МПа
210	140	60	5	57

Результаты. Была исследована усадка образцов после процессов дебайдинга и спекания образцов. В результате растворного дебайдинга усадка не наблюдалась, однако при увеличении времени процесса увеличивалось количество удаленного связующего. Общая линейная усадка после спекания составила около 15 %.



СЭМ-фотография распределения элементов в спеченном при 1090 °С образце: а — исходное фото; б — распределение меди; в — распределение вольфрама

Список литературы

1. Wang Y., Zhuo L., Yin E. Progress, challenges and potentials / trends of tungsten-copper (WCu) composites / pseudo-alloys: Fabrication, regulation and application // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2021. Vol. 100. P. 105648.
2. Vadchenko S. G. et al. Structure Formation of Cu–W Pseudo Alloys Upon Various Methods of Their Production // Russ. J. Non-Ferrous Metals. 2021. Vol. 62, № 4. P. 466–472.
3. Lerner M. I. et al. Structures of binary metallic nanoparticles produced by electrical explosion of two wires from immiscible elements // Powder Technol. 2016. Vol. 288. P. 371–378.

ГЛОБАЛЬНО-ЛОКАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА НАПРЯЖЕНИЯ

С. А. Туктаров, К. А. Балунов, А. А. Навоев, А. В. Чедрик

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)*

Наиболее общий метод оптимизации конструкций — это метод топологической оптимизации, который применяется для нахождения оптимального распределения силового материала [1]. Геометрия и форма финального проекта являются результатом топологической оптимизации. Ранее авторами было показано, что значительное снижение веса достигается после оптимизации параметров конструкции с учетом ограничений по прочности, потере устойчивости и по аэроупругости конструктивно-силовой схемы после интерпретации результатов топологической оптимизации [2, 3].

Целью данного исследования является разработка нового подхода к оптимизации конструкций, в которой напряжения должны учитываться на стадии топологической оптимизации. Как известно, задачи топологической оптимизации с ограничениями по напряжениям сложны в решении, поскольку большое число ограничений должно быть включено, а напряжение ведет себя крайне нелинейно по отношению к проектным переменным. В этой работе используются глобальные функции для аппроксимации локальных напряжений в зонах концентрации напряжений. Эти зоны находятся после первой стадии топологической оптимизации, которая основывается на алгоритме равнопрочной конструкции без учета размеров, который ведет к большим значениям плотностей в этих зонах. Вторая стадия топологической оптимизации заключается в определении распределения силового материала в зонах концентрации напряжений с учетом конструктивно-технологических ограничений на максимальные плотности. На рис. 1 и 2 изображены схемы алгоритмов топологической оптимизации на глобальной и локальной моделях.

Предложенный метод демонстрируется на примере тестового кронштейна и крыла малого удлинения. Показано, что разработанный подход является высокоэффективным. Приводится сравнение с результатами, полученными с помощью Nastran, в котором используется SIMP-метод при решении задач топологической оптимизации.

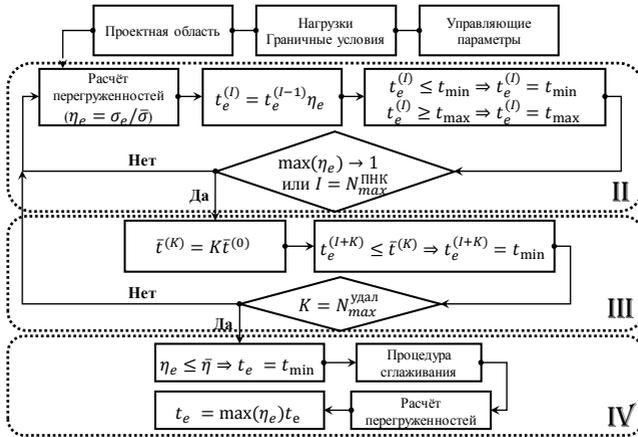


Рис. 1. Алгоритм для глобальной топологической оптимизации

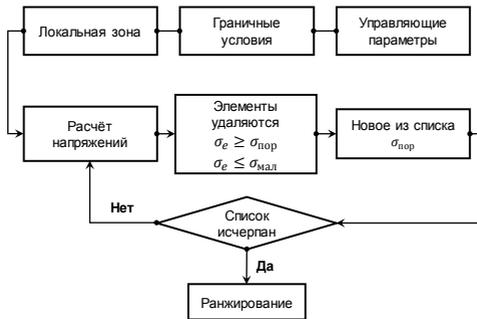


Рис. 2. Алгоритм для локальной топологической оптимизации

Список литературы

1. Xie Y.M., Huang X. Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications. Wiley, 2010. 223 p.
2. Александрин Ю. С., Туктаров С. А., Чедрик В. В. Проектирование силовой конструкции крыла вертолета на основе топологической и глобально-локальной оптимизации // Уч. зап. ЦАГИ, 2017. Т. XLVIII, № 1. С. 72–85.
3. Балунов К. А., Туктаров С. А., Уськов В. М., Чедрик В. В. Топологическая оптимизация как основа для синтеза и проектирования конструктивно-силовых схем авиационных конструкций // Материалы науч.-техн. конф. ЦАГИ «Прочность конструкций летательных аппаратов». М.: ЦАГИ, 2017. С. 266.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ АНТИПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ МОМЕНТНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ СО СТЕСНЕННЫМ ВРАЩЕНИЕМ

Р. И. Угрюмов

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Новосибирск*

В классической теории напряжений считается, что элементарный объем взаимодействует с окружающей средой посредством главного вектора силы, действующего на элемент поверхности. Главным моментом при этом пренебрегают. Наряду с классической теорией существует также моментная теория, учитывающая не только силовое, но и вращательное взаимодействие между частицами.

В общей моментной теории вместе с вектором перемещений вводится независимый вектор поворота. Таким образом, частица в моментной теории имеет шесть степеней свободы. Рассматривается также упрощенный вариант моментной теории: моментная теория со стесненным вращением. В ней вектор поворота не является независимым, вместо этого он связан с вектором перемещений такими же уравнениями, как и в классической теории.

Считается, что в большинстве приложений результаты, полученные с помощью классической модели с одной стороны и моментной с другой, мало отличаются, однако существует и ряд исключений. К таким исключениям относятся задачи теории трещин.

Рассмотрим антиплоскую задачу [1]. В этом случае вектор перемещений в декартовой системе координат будет иметь вид

$$\begin{aligned}u_1 &= 0, & u_2 &= 0, \\u_3 &= u(x_1, x_2).\end{aligned}$$

Попробуем решить данную задачу с помощью модели моментной теории упругости со стесненным вращением [2, 3]. Тензор деформаций определяется как в классической теории. Симметричная часть тензора напряжений связана с тензором деформаций обычными линейными соотношениями изотропного закона Гука. В соответствии с гипотезой о стесненном вращении, вектор поворота также определяется как в классической теории. Вводятся тензор изгиба-кручения и тензор моментных напряжений, связанные друг с другом линейным законом. Полученная система замыкается уравнениями равнове-

сия, которые вытекают как из закона сохранения импульса, как в классической теории, так и из закона сохранения момента импульса.

Исходя из сказанного выше, получим разрешающее уравнение относительно перемещений:

$$u_{,1111} + 2u_{,1122} + u_{,2222} + c^2(u_{,11} + u_{,22}) = 0, \quad (1)$$

где c — материальная постоянная. Можно показать, что уравнение (1) выполняется тогда и только тогда, когда решение имеет вид

$$\begin{aligned} u &= g + f, \\ g_{,11} + g_{,22} &= 0, \\ f_{,11} + f_{,22} + c^2 f &= 0, \end{aligned}$$

т. е. перемещения могут быть представлены как сумма произвольной гармонической функции g и произвольного решения уравнения Гельмгольца f , причем, если $f = 0$, моментные напряжения равны нулю, и решение сводится к классическому.

Будем считать, что $g = 0$, и, следуя [1], попробуем выбрать частное решение уравнения Гельмгольца, которое будет моделировать трещину продольного сдвига. Таким решением может быть, например,

$$u = c_1 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sin(cr)}{\sqrt{cr}} \sin(\varphi/2). \quad (2)$$

Здесь (r, φ) — полярные координаты в плоскости (x_1, x_2) ; c_1 — произвольная константа. Сравнивая решение (2) с классическим решением

$$u = \frac{K}{\mu} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{r} \sin(\varphi/2),$$

можно заметить, что в окрестности вершины трещины при $r \rightarrow 0$ они качественно не отличаются. Напряжения в решении (2) также имеют в нуле особенность вида $1/\sqrt{r}$.

В целом, решение (2) подтверждает классические результаты, однако содержит и ряд «внутренних» особенностей, связанных с тем, что моментная модель умеет отличать, например, напряжения σ_{13} и σ_{31} .

Список литературы

1. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела: учеб. пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
2. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. = Nowacki W. Teoria sprzystosci. Warszawa, 1970.

3. Морозов Н. Ф. Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984.

4. Аннин Б. Д., Остросаблин Н. И., Угрюмов Р. И. Двумерная задача о чистом сдвиге в моментной теории упругости со стесненным вращением // Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении: Материалы VI Дальнев. конф. с межд. участ. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 173–179.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕДИНЕННОЙ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ ГАЗА ДЛЯ НАДДУВА И ДЛЯ ГАЗОРЕАКТИВНЫХ СОПЕЛ СПАСАЕМОЙ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ *

В. А. Урбанский

Омский государственный технический университет, 644050, Омск

Новым этапом в разработке ракетно-космической техники является переход на создание спасаемых ступеней ракет-носителей (РН). Такие РН имеют меньшую стоимость выведения за счет возможного повторного использования дорогостоящих маршевых двигателей, а также снижают экологическую нагрузку за счет отказа от морских и сухопутных районов падения. Несмотря на простоту и надежность автономных реактивных систем управления (РСУ) на сжатом газе, они имеют достаточно большую пассивную массу газа и баллонов, что открывает путь для проведения исследований альтернативных вариантов для спасаемых РН. В данной работе предлагается использование объединенной вспомогательной установки (ОСПГ) на основе пероксида водорода (ПВ), которая выполняет функции РСУ на пассивных участках траектории и функции системы наддува на активных участках траектории. Такое объединение функций двух систем в одну позволяет не только уменьшить пассивную массу, но и решить несколько проблем системы наддува, связанных с длительным выходом на рабочий режим теплообменников и вследствие этого больших расходов газа наддува [1].

Из-за переноса теплообменников в межбаковый отсек в предложенной ОСПГ отсутствует необходимость подачи газа наддува к двигателю и обратно к верхним днищам бака для наддува, что сокращает длины магистралей газа наддува. Перенос теплообменников в межбаковый отсек делает их независимыми от маршевого двигателя, что дает возможность их предварительного нагрева до включения маршевого двигателя для сокращения времени выхода на рабочий температурный режим.

* Исследования проведены в рамках государственного задания № 2019-0251 от 02.05.2020 г. «Исследование процессов испарения жидкостей в топливных баках ракет-носителей для повышения экологической безопасности и экономической эффективности ракет-носителей с жидкостными ракетными двигателями».

Научный руководитель — В.И. Трушляков, д-р техн. наук, проф. кафедры авиа- и ракетостроения Омского государственного технического университета.

© В. А. Урбанский, 2023

Это также дает возможность проведения наземных испытаний систем наддува и теплообменников для нагрева гелия без работы маршевого двигателя.

Преимуществом данной системы является возможность полной пассивации бака О в случае аварийной ситуации за счет подачи горячих продуктов разложения ПВ в бак и испарения кислорода. Получаемая смесь используется в качестве рабочего тела для увода аварийной ступени в заданный район падения [2].

Список литературы

1. Ключева О. Г. Цилиндрический теплообменник двигателя Рд120 ракеты-носителя «Зенит» // Тр. НПО Энергомаш им. академика В. П. Глушко, 2017. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36314623> (accessed February 8, 2022).
2. Trushlyakov V. I., Urbansky V. A., Yudin V. V. Reducing Environmental Damage After Emergency Engine Cutoff of the Launch Vehicle // J. Spacecraft Rockets. Am. Inst. Aeronautics Astronautics. 2020. P. 1–12.

О ВЗАИМНОМ ДОПОЛНЕНИИ ФИЗИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В АЭРОАКУСТИКЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ*

Г.А. Фараносов, В.Ф. Копьев, С.А. Чернышев, О.П. Бычков

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н.Е. Жуковского, 105005, Москва*

Проблема шума турбулентных струй остается актуальной на протяжении многих лет, начиная с введения в эксплуатацию первых реактивных самолетов в середине XX в. Несмотря на значительный прогресс в понимании процессов, связанных с генерацией шума в струях, общепринятая теория данного явления пока отсутствует. При разработке физических моделей в качестве потенциальных источников шума в струях рассматриваются различные механизмы и их комбинации [1–10], в той или иной степени позволяющие объяснить имеющиеся экспериментальные данные. Чтобы понять, какие из предлагаемых моделей более адекватно описывают процессы шумообразования, оказывается полезным использование хорошо поставленного эксперимента, позволяющего вскрыть некоторые не вполне тривиальные закономерности акустического излучения струй.

Прогресс последних лет в высокопроизводительных вычислениях применительно к задачам аэроакустики струйных течений позволяет рассматривать вычислительный эксперимент при условии его тщательной валидации как мощный инструмент анализа, дополняющий возможности физического эксперимента.

Одной из нетривиальных характеристик звукового поля турбулентной струи является его азимутальная структура, в частности свойства излучения отдельных азимутальных мод в направлении вверх по потоку. Такое излучение затруднительно измерить в физическом эксперименте из-за ограниченности заглушенной камеры и наличия элементов системы подачи воздуха, вносящих паразитные отражения, однако его можно получить в численном

* Экспериментальная часть работы выполнена на базе УНУ «Заглушенная камера с потоком АК-2» ФАУ «ЦАГИ», модернизируемой при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по соглашению № 075-15-2022-1036.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-71-30016 — анализ и моделирование источников шума в струе, грант № 19-71-10064 — разработка методики физического и численного эксперимента).

© Г.А. Фараносов, В.Ф. Копьев, С.А. Чернышев, О.П. Бычков, 2023

эксперименте. При этом сам численный расчет может быть валидирован по данным физического эксперимента в тех зонах, где последний возможен [11].

В настоящей работе проведено исследование особенностей излучения дозвуковой турбулентной струи в заднюю полусферу на основе результатов численного моделирования. Показано, что только модели излучения, основанные на источниках квадрупольного типа, способны объяснить и описать данные вычислительного эксперимента.

Список литературы

1. Lighthill M. J. On sound generated aerodynamically: I. general theory // Proc. Royal Soc. Series A. 1952. V. 211. P. 564–581.
2. Tam C., Auriant L. Jet mixing noise from fine-scale turbulence // AIAA J. 1999. Vol. 37, № 2. P. 145–153.
3. Goldstein M. E. A generalized acoustic analogy // J. Fluid Mech. 2003. Vol. 488. P. 315–333.
4. Копьев В. Ф., Чернышев С. А. Новая корреляционная модель каскада турбулентных пульсаций как источника шума в струях // Акуст. журн., 2012. Т. 58, № 4. С. 482–497.
5. Седельников Т. Х. О частотном спектре шума сверхзвуковой струи. Физика аэродинамических шумов. М.: Наука, 1967.
6. Tam C. K. W., Burton D. E. Sound generated by instability waves of supersonic flows: Part 2. Axisymmetric jets // J. Fluid Mech. 1984. Vol. 138. P. 273–295.
7. Зайцев М. Ю., Копьев В. Ф., Чернышев С. А. Экспериментальное исследование роли волн неустойчивости в механизме излучения шума сверхзвуковой струей // Изв. РАН. МЖГ. 2009. № 4. С. 124–133.
8. Kopeiev V., Zaitsev M., Chernyshev S., Ostrikov N. Vortex ring input in subsonic jet noise // Int. J. Aeroacoustics. 2007. Vol. 6, № 4. P. 375–405.
9. Tam C. K., Viswanathan K., Ahuja K. K., Panda J. The sources of jet noise: experimental evidence // J. Fluid Mech. 2008. Vol. 615. P. 253–292.
10. Cavalieri A. V., Jordan P., Colonius T., Gervais Y. Axisymmetric superdirectivity in subsonic jets // J. Fluid Mech. 2012. Vol. 704. P. 388–420.
11. Бычков О. П., Зайцев М. Ю., Копьев В. Ф., Фараносов Г. А., Чернышев С. А. О двух подходах к моделированию шума низкоскоростных дозвуковых струй // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2022. Т. 506, № 1. С. 16–25.

МИКРОСТРУКТУРНЫЙ ДИЗАЙН 9–12 % CR МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ И ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ИХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ*

А. Э. Федосеева

*Белгородский государственный национальный
исследовательский университет, 308015, Белгород*

Применение в теплоэнергетике энергоблоков нового поколения, работающих на суперсверхкритических параметрах пара ($T \geq 620\text{--}650$ °С, $P = 250\text{--}350$ атмосфер), способно повысить их КПД до 41–45 % и снизить количество вредных выбросов в окружающую среду, в связи с чем остро стоит вопрос разработки новых недорогих материалов, способных выдерживать столь жесткие эксплуатационные условия [1]. Новые разработанные стали могут быть использованы в качестве конструкционного материала для элементов котлов и паропроводов, а также лопаток паровых турбин в новых энергоблоках для тепловых электростанций нового поколения, работающих при суперсверхкритических параметрах пара [2, 3].

Основное препятствие для использования высокохромистых сталей является высокотемпературная ползучесть, приводящая к существенной деградации структуры. Использование комплексного подхода с учетом анализа литературы и компьютерного моделирования позволило разработать порядка десяти химических составов жаропрочных высокохромистых сталей мартенситного класса на основе стали P92, работоспособных при температурах пара от 600 до 650 °С за счет повышения сопротивления ползучести. Было обнаружено, что высокая жаропрочность сталей данного класса достигается за счет формирования уникальной неравновесной структуры реечного троостомартенсита, которая имеет строгий иерархический характер и содержит высокую плотность дислокаций внутри реечного пространства. Границы структуры реечного троостомартенсита стабилизированы наноразмерными карбидами $M_{23}C_6$ и термодинамически неравновесными нанодисперсными карбонитридами типа MX, которые служат препятствиями для перестройки дислокаций. При разработке новых сталей использовалось несколько подходов к модификации микроструктурного дизайна, направленных на повышение стабильности неравновесной структуры троостомартенсита.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научно-го проекта № 19-73-10089-П.

© А. Э. Федосеева, 2023

Первый подход заключался в модификации химических составов сталей путем изменения соотношений между элементами замещения (кобальта, вольфрама, молибдена), элементами внедрения (азот, углерод, бор), а также их комбинацией с добавлением новых элементов (рений, медь, тантал). Дополнительное упрочнение твердого раствора кобальтом, вольфрамом и молибденом снизило скорость диффузионных процессов, в том числе и скорость укрупнения вторичных фаз, что привело к стабилизации неравновесной структуры в процессе ползучести и повысило длительную прочность сталей при 650 °С на базе 100 000 ч на 20 % по сравнению с P92 сталью. Снижение содержания азота с одновременным увеличением содержания бора затрудняет образование «вредных» частиц Z-фазы (CrVN) и благоприятно влияет на термическую стабильность карбидов $M_{23}C_6$ за счет снижения межфазной энергии частиц, расположенных по малоугловым границам мартенситных реек. Добавление рения и меди привело к тому, что в 9–10 % Cr сталях с высоким содержанием бора одновременно карбиды и фазы Лавеса, расположенные по малоугловым границам, начинают играть роль упрочняющих фаз, что приводит к существенному увеличению времени до разрушения вплоть до рекордно высоких значений в условиях высоких приложенных напряжений.

Второй подход заключается в изменении термической обработки или применении термомеханических обработок. Так, была разработана схема термической обработки для 9–10 % Cr–3 % Co стали, дополнительно легированной рением и медью, с низким содержанием азота и высоким содержанием бора, включающая высокую температуру нормализации и отпуск. Повышение температуры нормализации приводит к существенному увеличению доли малоугловых границ, стабилизированных мелкими частицами карбидов и фазы Лавеса.

Таким образом, оптимальный микроструктурный дизайн 9–12 % Cr сталей был установлен на основе исследований более десяти плавок с различным легированием, подвергнутых различным режимам термической/термомеханической обработки.

Список литературы

1. Kern T. U., Staubli M., Scarlin B. The European efforts in material development for 650°C USC power plants — COST522 // ISIJ Int. 2002. Vol. 242. P. 1515–1519.
2. Кайбышев Р., Скоробогатых В., Щенкова И. Новые стали мартенситного класса для тепловой энергетики // Физика металлов и металловедение. 2010. Т. 109, № 2. С. 200–215.
3. Abe F., Kern T.-U., Viswanathan R. Creep-resistant steels. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008.

ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ОТ РАЗМЕРА

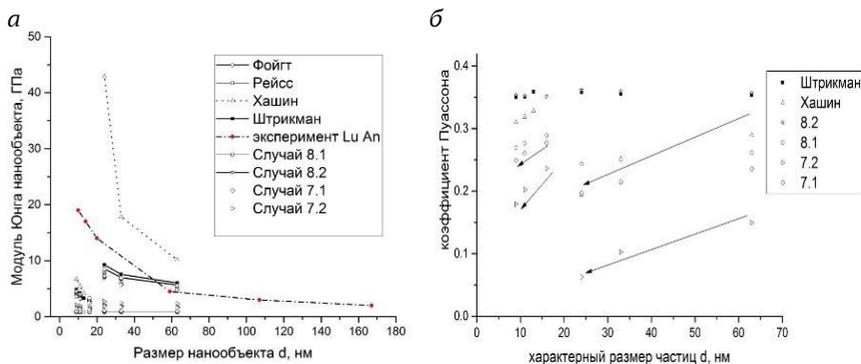
А. А. Филиппов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Известно, что при изменении характерного размера наноматериалов их характеристики могут изменяться в разы. Подобное изменение свойств в основном связано с большой удельной поверхностью и возникающих новых свойствах: повышенной тепло- и электропроводимости, высокой твердостью и прочностью. Например, большинством авторов работ по наполнению полимеров нанодисперсными частицами отмечено, что рост модуля упругости при добавлении частиц может достигать 30–50 % при концентрациях 0,2–5 % масс. Для определения упругих свойств наночастиц используются методы молекулярной динамики и квантовой механики, численное моделирование процессов деформирования нанообъектов, механические испытания наночастиц с использованием современной техники.

Тем не менее все вышеперечисленные методы достаточно сложны в реализации, имеют неточности в закладываемых моделях, что приводит к большим расхождениям в определении упругих модулей наночастиц. Целью настоящей работы является получение зависимости упругих характеристик для наночастиц Таркосила от их характерного размера. В качестве предлагаемого метода рассматривается экспериментально-теоретический подход, позволяющий рассчитать на основе экспериментальных данных и выбранной модели гомогенизации упругие свойства наночастиц. Предлагаемая модель гомогенизации позволяет осреднить упругие модули гетерогенного материала, находящегося в условиях одноосного растяжения и стесненного сжатия. В качестве предлагаемой гипотезы осреднения предлагаются такие соотношения между напряжениями и деформациями гетерогенного материала и входящих в его состав фаз, при которых выполняются законы сохранения импульса и энергии (далее модель 7.1, 7.2). Предложенная модель позволяет осреднить две независимые константы гетерогенного материала. Экспериментальное определение упругих модулей материала матрицы и гетерогенного материала осуществлялось с помощью механических испытаний на одноосное растяжение и стесненное сжатие образцов, изготовленных из эпоксидной смолы, наполненной наночастицами. Методика изготовления

образцов описана в работе [1], а испытания образцов на стесненное сжатие изложено в работе [2]. Полимеры, наполненные Таркосилом, дают прирост модуля Юнга с уменьшением размера частиц в диапазоне исследуемых концентраций от 0 до 5 % масс., от 18 до 30 %, а модуль стесненного сжатия — от 16 до 27 %. Имея экспериментально полученный набор экспериментальных данных для гетерогенного материала при различных размерах частиц наполнителя и внесенных концентрациях, предлагается определение упругих модулей частиц наполнителя с помощью функций, определяемых из моделей гомогенизации.



Модуль Юнга (а); коэффициент Пуассона для наночастиц Таркосила в зависимости от размера (б)

Полученные экспериментально-теоретическим путем данные позволяют оценивать значения модулей упругости наночастиц для ряда существующих и предложенных моделей. Видно, что предложенные зависимости качественно подобно описывают рост модуля упругости, определенный в эксперименте, модуля Юнга, наночастиц Таркосила на 30–0 % при уменьшении среднего размера частиц от 63 до 22 нм [3].

Показано (см. рисунок), что значения, полученные для предложенных случаев 7.1, 7.2 и 8.1, демонстрируют уменьшение модуля с уменьшением размера наночастиц.

Список литературы

1. Vaganova T.A., Brusentseva T.A., Filippov A.A., Malykhin E.V. Synthesis and characterization of epoxy-anhydride polymers modified by polyfluoroaromatic oligoimides // J. Polym. Res. 2014. Vol. 21, № 11. P. 7.

2. Filippov A.A., Fomin V.M., Karpov E.V. Experimental determination of the elastic characteristics of filled polymers using mechanical tests for constrained compression // AIP Conf. Proc. 2019. Vol. 2125.
3. An L., Zhang D., Zhang L. Effect of nanoparticle size on the mechanical properties of nanoparticle assemblies // Nanoscale. Royal Soc. Chem. 2019. Vol. 11. P. 9563–9573.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕЛИЕВОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ КРЕМНЕЗЕМНЫХ МИКРОСФЕР

М. В. Фролов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Разработка и совершенствование перспективного мембранного метода выделения газообразного гелия из природного газа — актуальное направление. В настоящее время реальным промышленным вариантом этого метода является уникальная мембранно-сорбционная технология, предложенная сотрудниками Института теоретической и прикладной механики СО РАН. Особенность технологии заключается в использовании для выделения гелия полых синтетических стеклянных микросферических частиц в качестве мембран, которые обеспечивают гигантскую площадь поверхности мембран относительно величины их объема. Стенки микросфер обладают высокой селективной проницаемостью по отношению к гелию. Для совершенствования этого метода необходимы всесторонние исследования характеристик гелиевой проницаемости микросфер. В данной работе изучается кремнеземные микросферы, которые содержат диоксид кремния (SiO_2) более 80 % и небольшое количество примесей. Они обладают гладкой однородной поверхностью, имеют насыпную плотность величиной $0,2 \text{ г/см}^3$, размеры распределены в пределах от 12 до 240 мкм, а средний диаметр равен 52 мкм.

Важным моментом мембранного метода является температурная зависимость гелиевой проницаемости стенок микросфер. Для исследования влияния температуры создан экспериментальный стенд, проведен эксперимент: в емкость с микросферами напускается гелий, который поглощают микросферы, в связи с чем происходит падение давления. По характеру падения определяются коэффициенты проницаемости материала стенки кремнеземных микросфер и энергия активации для диффузии атомов гелия в материале стекла микросфер для диапазона температур $21,5\text{--}110 \text{ }^\circ\text{C}$.

Эксперимент был дополнен численным моделированием задач проникновения гелия в микросферы в рамках математической модели поглощения гелия микросферами с учетом их дисперсионного распределения по размерам и проницаемости в случае дискретного распределения параметров.

КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРОДАХ- КОЛЛЕКТОРАХ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАГРУЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ*

В. В. Химуля

*Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,
119526, Москва*

На территории РФ действует уникальная Единая система газоснабжения, включающая в себя систему подземных хранилищ газа (ПХГ). Наибольшее число ПХГ сегодня создается в истощенных месторождениях или в водоносных пластах. Однако, независимо от типа ПХГ, его безопасное и эффективное функционирование зависит от правильного режима эксплуатации [1]. Для обоснования рациональных режимов работы скважин для конкретных условий ПХГ, для определения оптимальных способов заканчивания скважин, а также для определения возможности улучшения эксплуатационных показателей путем управления напряженно-деформированным состоянием породы необходимо проведение комплексных исследований, включающих физическое моделирование деформационных и фильтрационных процессов в призабойной зоне пласта и последующий анализ изменений внутреннего пространства породы.

Изменение напряженного состояния в коллекторах ПХГ при циклических операциях на скважинах может существенно влиять на их проницаемость. Ухудшение фильтрационных характеристик пород может также вызывать периодическая закачка больших объемов газа с механическими примесями и каплями масла [2].

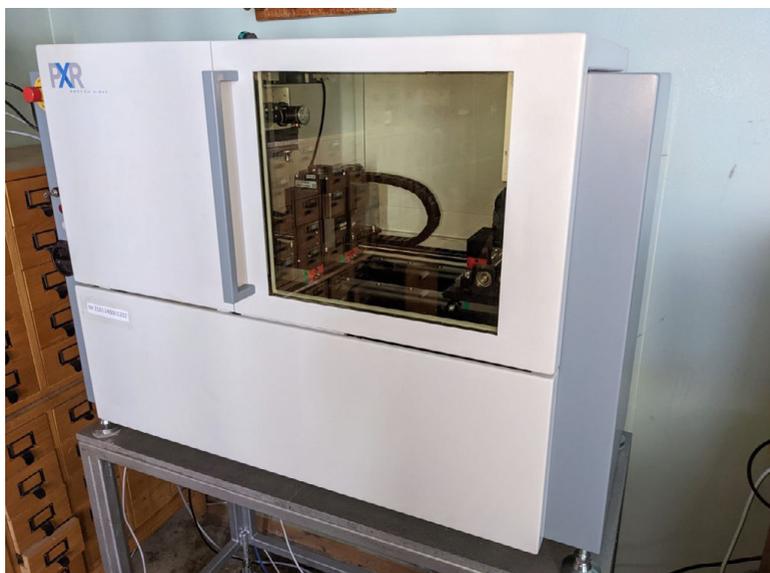
Одним из перспективных способов решения проблемы снижения проницаемости в окрестности скважин в ходе эксплуатации является разработанный в ИПМех РАН метод направленной разгрузки пласта (НРП). Идея его состоит в искусственном создании в пласте разветвленной системы трещин, которая играет роль новой системы фильтрационных каналов [3]. Растрескивание, разрыхление породы можно вызвать, используя упругую энергию, запасенную в массиве горных пород. В силу циклического изменения пластового давления на ПХГ в ходе эксплуатации, реализация метода

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-11-00273).
© В. В. Химуля, 2023

НРП имеет ряд отличительных особенностей по сравнению с применением на обычных месторождениях.

В работе представлены результаты комплексных исследований горных пород Арбузовского ПХГ, включающих физическое моделирование процессов деформирования и фильтрации в породах в условиях реально возникающих на стенках скважины напряженных состояний при реализации метода направленной разгрузки пласта, а также изучение изменений внутренней структуры образцов средствами рентгеновской компьютерной томографии. Геомеханические испытания проводились на уникальной Испытательной системе трехосного независимого нагружения Института проблем механики РАН. Были составлены программы нагружения образцов на основе методов теории упругости. Получены кривые деформирования и кривые ползучести пород в условиях сложного трехосного нагружения, установлены реологические и фильтрационные характеристики и их зависимости от напряжений.

Исследование изменений внутренней структуры образцов выполнено с использованием высокоразрешающего рентгеновского микротомографа ProCon CT-MINI (см. рисунок). Проведен количественный и качественный анализ образовавшейся в образцах системы макротрещин. С помощью модуля FlowDict проведено численное моделирование потока фильтрации



Высокоразрешающий рентгеновский микротомограф ProCon CT-MINI

на полученных по результатам съемки структурах для оценки трещинной проницаемости образцов. Полученные результаты указывают на то, что метод направленной разгрузки пласта может быть успешно применен с целью увеличения проницаемости в окрестности скважин ПХГ за счет создания необходимого уровня напряжений.

Список литературы

1. Орловский С. Л. Основные проблемы при отборе газа из подземного хранилища // Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения: Сб. науч. тр. Уфа, 2016. С. 324–330.
2. Басов С. А. Водоизоляционные работы с изменением конструкции фильтра скважин подземных хранилищ газа (ПХГ) // Бурение и нефть. 2008. № 10. С. 26–29.
3. Karev V., Kovalenko Yu., Ustinov K. Geomechanics of Oil and Gas Wells. Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 166.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ПРИ ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ*

В. Д. Чепеленкова, В. В. Лисица

*Институт нефтегазовой геологии
и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск*

Сеточные методы, традиционно используемые для моделирования упругих сред, имеют существенные ограничения при работе в рамках больших деформаций и нарушений сплошности. Поэтому, например, в задачах геомеханики для исследования формирования и развития трещин и разломов получили развитие бессеточные методы, в частности метод дискретных элементов. Подробное сравнение данных классов методов приведено в [1].

Метод дискретных элементов (DEM) использует представление исследуемого материала в виде совокупности отдельных частиц, являющихся твердыми телами, имеющими заданную геометрию, положения в пространстве и некоторый набор упругих параметров. Поведение всей системы частиц при этом определяется выбором сил их попарного взаимодействия, а закон движения описывается уравнениями классической механики [2].

Однако в рамках DEM характеристики отдельных частиц, не совпадают с таковыми для всего материала в целом, поэтому метод требует калибровки с проведением экспериментов на реальном материале и подбором соответствующих входных параметров для моделирования. Исследование влияния параметров частиц на поведение материала при моделировании с помощью метода дискретных элементов проведено для сыпучих сред, например, в [3].

В данной работе представлена реализация метода дискретных элементов со связями, использующая вычисления на графических ускорителях с помощью архитектуры CUDA, для моделирования разрушения материала в тесте на одноосное сжатие. Проведена серия численных экспериментов для определения зависимостей предельной нагрузки, выдерживаемой образцом, и его модуля Юнга от выбора параметров частиц. По полученным данным построено полиномиальное приближение, позволяющее значительно уменьшить диапазон подбора параметров для материалов с заранее известными упругими характеристиками.

* Работа выполнена в рамках гос. задания 0266-2022-0022.

© В. Д. Чепеленкова, В. В. Лисица, 2023

Список литературы

1. Gray G. G., Morgan J. K., Sanz P. F. Overview of continuum and particle dynamics methods for mechanical modeling of contractional geologic structures // J. Struct. Geol. 2014. Vol. 59. P. 19–36.

2. Luding S. Introduction to discrete element methods: basics of contact force models and how to perform the micro-macro transition to continuum theory // Eur. J. Environ. Civil Eng. 2008. Vol. 12, № 7–8. P. 785–826.

3. Yan Z., Wilkinson S. K., Stitt E. H., Marigo M. Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis // Comput. Part. Mech. 2015. Vol. 2, № 3. P. 283–299.

ВЛИЯНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО РАССЛОЕНИЯ ФАЗ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОДОГАЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ*

А.А. Чернова

Научно-исследовательский институт механики МГУ, 119192, Москва

Исследуется водогазовое воздействие на нефтяные пласты, т. е. газовый метод увеличения нефтеотдачи, предполагающий закачку воды и углекислого газа в пласт. Применение такого воздействия осложняется возможностью гравитационного расслоения фаз, приводящего к неравномерному охвату пласта вытесняющими агентами. Газ, как более легкая фаза, может подниматься к кровле пласта, а вода, как более тяжелая фаза, может опускаться к подошве пласта.

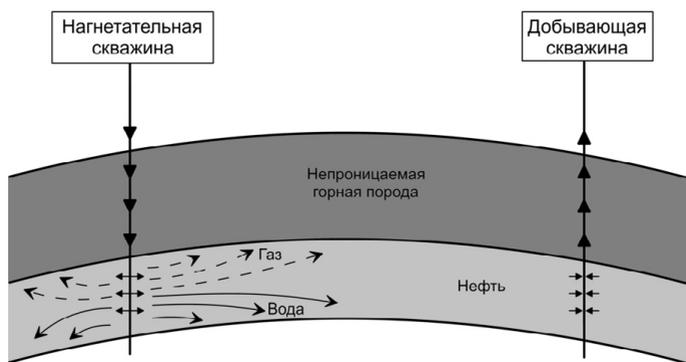


Схема течения

Рассмотрена двумерная постановка задачи фильтрации в области, описывающей срез проницаемого пласта между нагнетательной и добывающей скважинами. Рассмотрены различные стратегии закачки воды и углекислого газа, а также различные положения перфораций нагнетательной и добывающей скважин.

Из системы уравнений, описывающей течение воды и двухфазной углеводородной смеси, определены безразмерные параметры, характеризующие

* Исследования выполнены при поддержке РФФИ (№ 19-71-10051-П).

© А. А. Чернова, 2023

стратификацию фаз. Показано, что эффективность водогазового воздействия зависит от трех параметров подобия [1]. Проведено параметрическое исследование оптимальных стратегий закачки воды и углекислого газа при изменении критериев подобия. Построена диаграмма оптимальных стратегий водогазового воздействия. Исследованы оптимальные интервалы перфорирования нагнетательной и добывающей скважин для различных значений предложенного параметра.

Список литературы

1. Чернова А. А., Афанасьев А. А. Влияние гравитационного расслоения фаз на оптимальные режимы водогазового воздействия на нефтяные пласты // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2022. № 5. С. 51–61.

КАТЯЩИЕСЯ ВОЛНЫ И АВТОВОЛНОВЫЕ СТРУКТУРЫ В ТЕЧЕНИЯХ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

А. А. Чесноков

*Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Новосибирск*

Возникновение квазипериодического нелинейного волнового режима течения из неустойчивого равномерного потока характерно для широкого класса движений жидкости и неоднородных сред. В гидравлике открытых наклонных русел такой режим течения получил название «катящиеся волны» [1]. Математическое описание этого явления в рамках неоднородных систем гиперболических уравнений сводится к построению решений в классе бегущих волн, в которых непрерывные участки решения разделены сильными разрывами [2, 3]. Особенностью таких движений жидкости является непрерывный переход от докритического течения к сверхкритическому режиму в системе координат, движущейся вместе с волной. Процесс формирования квазипериодической волн конечной амплитуды в каналах и трубах легко воспроизводим в лабораторных условиях. Поскольку катящиеся волны существенно меняют режим течения, их исследование представляет практический интерес.

В работе излагается общая теория катящихся волн и ее приложение к описанию нелинейных волновых процессов в течениях жидкости и газа. Рассматриваются математические модели движения тонкого слоя неньютоновской жидкости со свободной границей [4], двухслойного течения Хеле-Шоу [5], движения жидкости в вертикальных трубках с податливыми стенками [6], а также уравнения распространения волн в идеальном газе с внешними источниками притока и диссипации энергии [7]. Все перечисленные модели представляются в виде гиперболических систем уравнений с правой частью. В зависимости от задачи в правой части уравнений, учитывается сила тяжести, трение, перепад давления или источник энергии. Обращение в нуль правой части уравнений движения определяет класс базовых постоянных течений, характеризующихся функциональной зависимостью, например, между скоростью и глубиной, а также упрощенную равновесную модель. С использованием критерия Уизема [1], состоящего в сравнении скоростей «замороженных» и «равновесных» характеристик, формулируются условия неустойчивости базового решения и определяется область параметров, при которых возможно формирование волн конеч-

ной амплитуды. В классе бегущих волн построены двухпараметрические семейства точных периодических решений моделей, соответствующих катящимся волнам. Выполненные численные эксперименты демонстрируют возникновение волн конечной амплитуды при внесении малых возмущений в граничные условия или начальные данные. При этом профиль волн, получаемых в нестационарных расчетах, совпадает с периодическим решением в классе бегущих волн.

Специфика рассматриваемых моделей проявляется в особенностях формирующихся нелинейных волновых режимов течения. В частности, в слоистых течениях Хеле-Шоу могут генерироваться катящиеся волны, распространяющиеся против потока [5]. Структура катящихся волн в эластичных трубках зависит от уравнения состояния, связывающего давление жидкости с площадью поперечного сечения трубки. При невыпуклом уравнении состояния формируются периодические решения с двумя сильными разрывами и двумя участками непрерывного течения [6]. Развитые в [3] методы исследования сдвиговых потоков позволили сравнить условия формирования катящихся волн и их амплитуды в рамках осредненных уравнений течения степенной жидкости в наклонном открытом канале с более общей моделью, учитывающей распределение скорости по глубине [4]. Возможность усиления малых возмущений в покоящейся среде является особенностью развития неустойчивости в идеальном газе с источниками притока и диссипации энергии. В этом случае направления распространения волн равноправны. При задании малых локализованных возмущений формируются пакеты катящихся волн, движущиеся в противоположных направлениях, а также двухпиковые волновые структуры в области между расходящимися катящимися волнами.

Список литературы

1. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
2. Dressler R. F. Mathematical solution of the problem of roll-waves in inclined open channels // Commun. Pure Appl. Math. 1949. Vol. 2, № 2–3. P. 149–194.
3. Ляпидевский В. Ю., Тешуков В. М. Математические модели распространения длинных волн в неоднородной жидкости. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
4. Chesnokov A. A. Formation and evolution of roll waves in a shallow free surface flow of a power-law fluid down an inclined plane // Wave motionl 2021. Vol. 106. 102799.
5. Chesnokov A. A., Liapidevskii V. Yu., Stepanova I. V. Roll waves structure in two-layer Hele-Shaw flows // Wave Motionl. 2017. Vol. 73. P. 1–10.
6. Чесноков А. А., Ляпидевский В. Ю. Структура катящихся волн в длинных трубках с податливыми стенками // Тр. МИАН. 2018. Т. 300. С. 205–215.
7. Molevich N. E., Riashchikov D. S. Shock wave structures in an isentropically unstable heat-releasing gas // Phys. Fluids. 2021. Vol. 33. 076110.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ВЧ-ПЛАЗМЫ ПониЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ВАКУУМА*

А. Ю. Шемахин

*Казанский (Приволжский) федеральный
университет, 420008, Казань*

В работе рассматривается математическая модель потока высокочастотной (ВЧ) плазмы пониженного давления для цилиндрической вакуумной камеры в условиях динамического вакуума. ВЧ-плазма, создаваемая высокочастотными разрядами при пониженных давлениях ($p = 13,3\text{--}133$ Па), успешно используется для модификации материалов различной физической природы: сталь, титан, полиэтилен, кожа мех и др. [1]. Температура электронов исследуемого вида плазмы в расчетах составляет 1–2 эВ, степень ионизации $10^{-7}\text{--}10^{-5}$, концентрация электронов $10^{15}\text{--}10^{19}$ м⁻³.

Оценки чисел Кнудсена для ионов, электронов и несущего газа показали, что для течения электронов и ионов применим режим сплошной среды, в то время как течение несущего нейтрального газа происходит в переходном режиме между свободномолекулярным потоком и течением в режиме сплошной среды (число Кнудсена находится в диапазоне между $0,08 < Kn < 0,7$).

Разработана гибридная математическая модель потока ВЧ-плазмы пониженного давления, которая включает в себя уравнение Больцмана для нейтральной компоненты ВЧ-плазмы, уравнение непрерывности и теплопроводности для электронной компоненты, уравнение Пуассона для потенциальной компоненты электромагнитного поля, телеграфные уравнения для вихревой компоненты электромагнитного поля, уравнения непрерывности для ионной и метастабильной компонент и замыкающие соотношения.

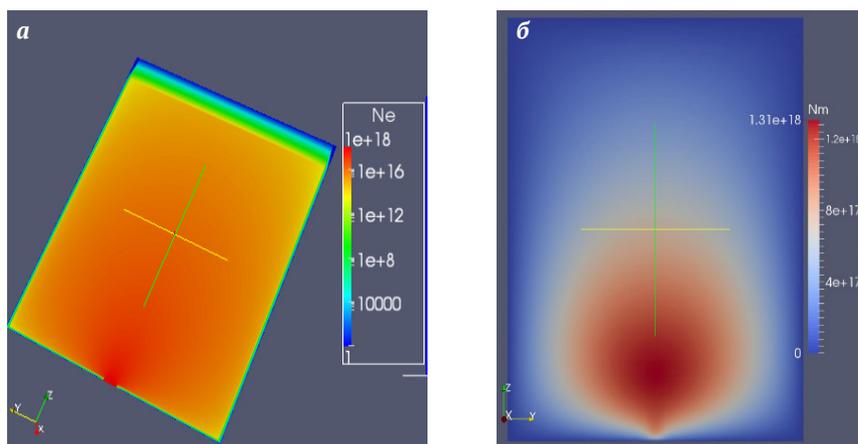
Для расчета основных характеристик потока ВЧ-плазмы пониженного давления разработана программа, которая позволяет найти пространственное распределение основных характеристик потока плазмы пониженного давления для цилиндрической вакуумной камеры. Для расчета процессов в переходном режиме используется метод Г. Бёрда [2], для процессов в режиме сплошной среды — метод конечных объемов. Разработанная програм-

* Исследование выполнено за счет гранта РФФ (проект № 19-71-10055).

© А. Ю. Шемахин, 2023

ма использует библиотеки пакета OpenFOAM и работает под управлением ОС Linux [3].

Получены результаты расчетов температуры, давления и скорости потока несущего газа аргона, распределение концентраций электронов, ионов, метастабильных атомов и параметры потенциальной и вихревой составляющих электромагнитного поля для вакуумной камеры длиной 0,5 м. В частности, для концентрации электронов и метастабильных частиц получено, что концентрация электронов максимальна на входе в вакуумную камеру, а у стенок резко убывает, что соответствует процессу рекомбинации атомов на стенках вакуумной камеры. Максимум концентрации метастабильных частиц сосредоточен у входа в вакуумную камеру вдоль ее оси. Из расчетов видно (см. рисунок), что максимальное значение концентрации метастабилей превышает максимальное значение концентрации электронов в 1,31 раза, т. е. метастабильные частицы оказывают существенное влияние на разряд.



Концентрации частиц в продольном срезе вакуумной камеры (в $1/\text{м}^3$):
a — концентрация электронов; *б* — концентрация метастабилей

Список литературы

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Шаехов М.Ф. Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления: моногр. Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2007. 356 с.
2. Берд Г.А. Молекулярная газовая динамика. М., 1981.
3. Пакет OpenFOAM. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://openfoam.com>

ВЫБОР НЕОБХОДИМОЙ СТЕПЕНИ ПОДВИЖНОСТИ ПИЛОТАЖНОГО СТЕНДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ И СВАЛИВАНИЯ

В. П. Широких¹, Ю. А. Архангельский²,
Л. Е. Зайчик², С. А. Сорокин²

¹ Филиал «Региональные самолеты»

ПАО «Корпорация Иркут», 115280, Москва

² Центральный аэрогидродинамический институт,
им. проф. Н. Е. Жуковского, 140181, г. Жуковский (Моск. обл.)

В связи с пониманием необходимости создания расширенной математической модели полета самолета транспортной категории для подготовки на тренажерных устройствах пилотов гражданской авиации с целью предотвращения попадания в сложное пространственное положение и (или) в сваливание (СППиС), а также вывода самолета из таких состояний обоснованно встает вопрос об использовании системы подвижности тренажерных устройств. Известно, что тренажерные устройства на базе платформы Стюарта, в основном используемые в гражданской авиации, обладают существенными ограничениями для воспроизведения больших низкочастотных нормальных перегрузок, которые характерны для вывода самолета из СППиС (~2,5–3,0 ед. перегрузки). Кроме того, ложные сигналы, возникающие при моделировании этого этапа, могут исказить представление о маневре даже больше, чем отсутствие подвижности.

На основе анализа акселерационных сигналов, возникающих при попадании в СППиС, и ложных сигналов, возникающих при их воспроизведении, сформулирована гипотеза о необходимой степени подвижности пилотажного стенда для моделирования сценариев попадания самолета транспортной категории в СППиС: для моделирования этапа перед сваливанием и при сваливании требуется воспроизведение движения по всем шести степеням свободы, для этапа после сваливания — воспроизведение только бафтинга.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы на пилотажном стенде ПСПК-102 ЦАГИ проведены эксперименты, в которых рассмотрены три варианта работы системы подвижности: неподвижный стенд, воспроизведение только бафтинга и полная подвижность. Использовалась обобщенная математическая модель гипотетического магистрального самолета в рас-

ширенной области режимов полета со следующими аэродинамическими особенностями: углы атаки до $+50^\circ$, гистерезис, бафтинг, завалы по крену. Моделировались три «ветровых» сценария сваливания (сдвиг ветра, порыв ветра, «микровзрыв»), а также режим сваливания путем медленного торможения. В экспериментах принимали участие четыре летчика-испытателя, имеющие большой опыт полета на большие углы атаки, включая случаи сваливания.

По завершении серии экспериментов каждый летчик заполнял опросный лист, где рассматриваемый вариант подвижности предлагалось оценить по специальной шкале. Кроме того, в опросных листах летчики отвечали на вопросы анкеты и давали развернутые комментарии в свободной форме.

Полученные данные и комментарии летчиков позволили подтвердить состоятельность выдвинутой гипотезы о необходимом количестве степеней свободы пилотажного стенда для проведения экспериментальных исследований критических режимов полета самолета транспортной категории и тренировки летчиков.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕНТГЕНОКОНТРАСТНЫХ ДОБАВОК НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕПЛАСТИКОВ С ДОБАВЛЕНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

П. А. Шупик, А. А. Филиппов

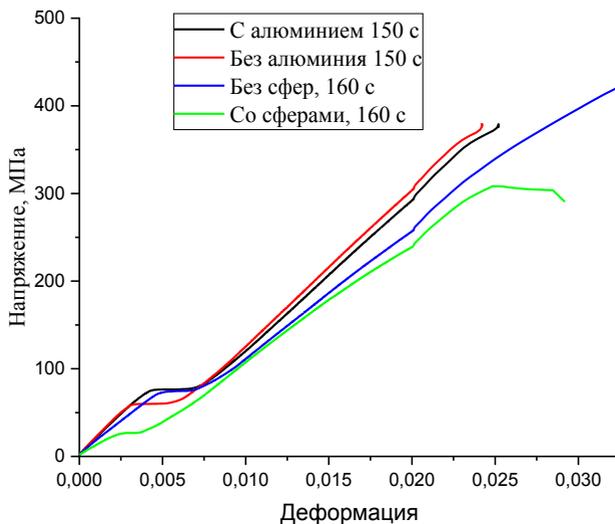
*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Композитный материал представляет собой материал, изготовленный как минимум из двух фаз с различными физическими характеристиками, которые в сочетании приводят к появлению нового материала с новыми характеристиками. Эти характеристики не являются суперпозицией исходных материалов, следовательно, сочетание материалов позволяет улучшить характеристики материала, сделать его прочнее и легче. Однако до сих пор мало что известно о процессе разрушения волокнистых углекомполитов изнутри, понять этот процесс помогает синхротронное излучение. Для этого необходимы также определенные добавки в образец, которые меняют его характеристики.

Целью данной работы было исследование влияния рентгеноконтрастных добавок на механические характеристики композитного материала. В качестве образцов для испытаний были использованы спрессованные между собой одинаковые отрезки препрегов, изготовленных из однонаправленного углеволокна Zoltec SC-30, пропитанного неотвержденной смесью эпоксидной смолы SR8500 и отвердителя марки Sicomine в заданном соотношении, между которыми добавляли просвечивающий материал. Для повышения упруго-прочностных показателей эпоксидная смола была наполнена одностенными нанотрубками марки OCSiAl. В качестве рентгеноконтрастных частиц использовались порошок алюминия марки АСД-1 и полые стеклянные микросферы марки МС-ВП-А9. Прессование препрега осуществлялось при температурах 150 и 160 °С.

Механические испытания на одноосное растяжение проводились для образцов размерами 80 × 3,6 × 1,9 мм на испытательной установке Zwick Roell Z005. Были проведены испытания на растяжение четырех серий образцов: спрессованных при 160 °С с добавлением алюминия и микросфер и аналогичных, спрессованных при температуре 150 °С. Были получены графики зависимости деформации от напряжения для разных добавок.

Из графиков на рисунке видно, что микросферы заметно ухудшают максимальное напряжение образцов. Связано это с тем, что сами образцы не рвались, как в случае с алюминием, а расслаивались из-за свойств самих сфер.



Средние результаты образцов каждой серии

Алюминиевый порошок влияет на механические характеристики образца значительно меньше, чем микросферы из диоксида кремния, однако вторые более контрастны при микрорентгеновском облучении. Добавление рентгеноконтрастных частиц при данной технологии получения образца снижает модуль упругости композитного материала. Увеличение максимальной температуры полимеризации приводит к снижению модуля упругости, однако при этом возрастает максимальное напряжение.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ*

М. А. Ядренкин

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Обтекание элементов конструкции летательных аппаратов, такие как крыло, фюзеляж, хвостовое оперение, связано с возникновением различных газодинамических процессов, возникающих под действием сил вязкого трения при взаимодействии набегающего газового потока с обтекаемой поверхностью. Стационарные и нестационарные явления в пограничном слое могут значительно влиять на аэродинамические характеристики летательного аппарата, поэтому разработка новых способов воздействия на структуру пристеночного течения является важной и актуальной задачей. Предложенный в данной работе способ создания объемных сил в тонком пристеночном слое газа с использованием комбинированных электрических разрядов в постоянном магнитном поле направлен на изменение структуры потока непосредственно в толщине пограничного слоя, что может повысить эффективность способа даже при сверхзвуковом обтекании поверхности.

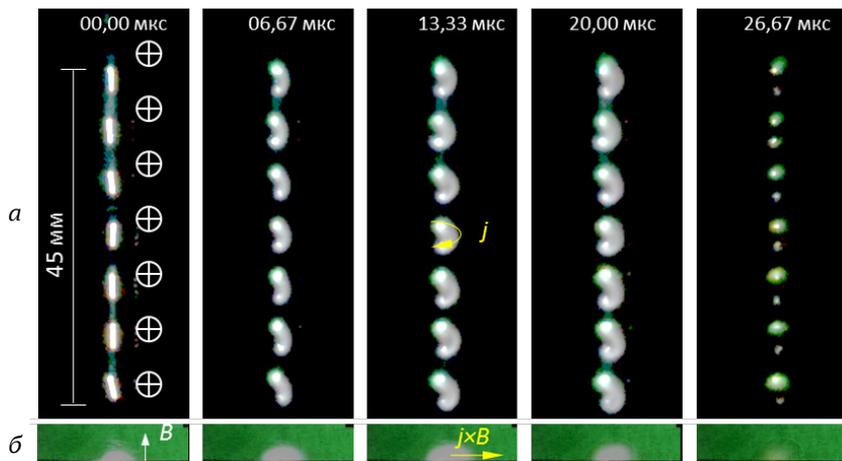
Настоящая работа — это первый шаг к реализации предложенного способа воздействия на структуру пристеночного течения. В работе исследован субмиллиметровый (длина разрядного промежутка около 1–3 мм) высоковольтный электрический разряд, инициализируемый в высокочастотном режиме в неподвижном газе и в магнитном поле. Так как в дальнейшем планируется исследовать разряд в сверхзвуковом потоке, разряд был рассмотрен в диапазоне давлений, которые будут реализованы в потоке. Процесс горения разряда был снят на высокоскоростную видеокамеру Photron SA-Z с частотой до 150 кГц. Вольтамперные характеристики разряда были получены с помощью высокочастотных трансформаторов тока и цифровых осциллографов.

На рисунке показаны кадры скоростной видеосъемки линейки дуговых субмиллиметровых разрядов при давлении 150 торр и магнитном поле 0,14 Тл: вид на плоскость и вид вдоль поверхности. Исследования показали,

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 23-29-00825), <https://rscf.ru/project/23-29-00825/>

© М. А. Ядренкин, 2023

что в процессе горения каждого импульса происходит движение дуги разряда в магнитном поле под действием силы Ампера. Вклад энергии в импульсе приводит к формированию нагретой области газа и следующий пробой осуществляется уже внутри данной области.



Горение дугового разряда в магнитном поле в неподвижном газе: *а* — вид на пластину с электродами; *б* — вид вдоль пластины поперек магнитного поля

СТРУКТУРА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ОТ ДВУХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПЛАСТИНЫ*

А. А. Яцких, Л. В. Афанасьев,
В. Л. Кочарин, Н. В. Семенов, А. Д. Косинов

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск*

Турбулизация течения в пограничном слое происходит вследствие возникновения и эволюции возмущений различного типа, их роста и взаимодействия друг с другом. Подробные данные по эволюции возмущений в пограничных слоях удается получать в контролируемых условиях, когда в поток вводятся возмущения с фиксированными начальными параметрами, что позволяет определять характеристики развития возмущений. В экспериментах при сверхзвуковых скоростях потока наиболее отработанным методом возбуждения контролируемых возмущений является тлеющий разряд, зажигаемый в локальной области экспериментальной модели. В случае периодического зажигания разряда в пограничном слое формируется возмущение, обладающее узким частотным и широким волновым спектром (волновые поезда) [1]. В случае импульсного воздействия в пограничном слое формируется локализованное в пространстве и времени возмущение (волновой пакет) [2].

В задачах по изучению нелинейной стадии развития возмущений в пограничном слое важную роль может играть начальная структура возмущений. Необходима экспериментальная методика контролируемого ввода искусственных пульсаций в пограничный слой, параметры которых (амплитуда, частотный и волновой состав, начальное фазовое распределение и т. д.) могли бы варьироваться в широких пределах. Используемые сегодня при высоких скоростях методы, основанные на локализованном одиночном источнике, не дают такой возможности. Возможным способом является возбуждение контролируемых возмущений комплексом из нескольких источников, разнесенных в пространстве и времени. Такой подход эффективен при малых дозвуковых скоростях потока [3, 4].

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (№ 21-79-00097), <https://rscf.ru/project/21-79-00097/>. Работа выполнена на базе ЦКП «Механика» ИТПМ СО РАН.

© А. А. Яцких, Л. В. Афанасьев, В. Л. Кочарин, Н. В. Семенов, А. Д. Косинов, 2023

В 2018–2019 гг. в ИТПМ СО РАН для случая сверхзвуковых скоростей потока были проведены расчетно-экспериментальные исследования по развитию контролируемых периодических возмущений с узким частотным спектром, генерируемые в пограничном слое пластины двумя точечными источниками [5]. В случае синхронной работы двух источников в волновых спектрах наблюдалось образование узлов и пучностей, а при наличии сдвига фаз — смещение положения узлов и пучностей в волновом спектре. Это соответствует интерференции волн, порожденных разнесенными источниками возмущений. Эти исследования показали, что с помощью двух источников возможно изменять структуру вводимых возмущений.

В данной работе представляются данные экспериментов по формированию возмущений от двух импульсных источников в ламинарном пограничном слое пластины при числе Маха 2. Эксперименты выполнены в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН на модели пластины с острой передней кромкой. Два источника (импульсный тлеющий разряд) располагались параллельно передней кромке пластины на расстоянии 6 мм друг от друга. Пульсации потока измерялись с помощью ниточного датчика термоанемометра, запись сигнала производилась синхронно с зажиганием разрядов, что позволило выделить возмущения от разрядов из фона случайных естественных пульсаций пограничного слоя. Анализируются пространственная структура и частотно-волновой состав генерируемых возмущений. Получено, что взаимодействие возмущений от разрядов происходит в центральной области, тогда как на боковых фронтах пульсации не изменяются. В волновых спектрах возмущений от разряда формируются узлы и пучности, положение которых определяется расположением источников и временной задержкой в их работе. Экспериментальные данные сопоставляются с результатами численного моделирования, получено качественное соответствие.

Список литературы

1. Kosinov A. D., Maslov A. A., Shevelkov S. G. Experiments on stability of supersonic boundary layers // *J. Fluid Mech.* 1990. Vol. 219. P. 621–633.
2. Яцких А. А., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В. Эволюция волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины // *Теплофизика и аэромеханика.* 2015. Т. 22, № 1. С. 17–28.
3. Гилев В. М., Козлов В. В. Влияние периодического вдува-отсоса на процесс перехода в пограничном слое // *Уч. зап. ЦАГИ.* 1986. Т. 17, № 3. С. 27–33.
4. Borodulin V. I., Kachanov Yu. S. On properties of the deterministic turbulence and reproducibility of its instantaneous and statistical characteristics // *Theor. Appl. Mech. Lett.* 2014. Vol. 4, № 6. 062004.
5. Kolosov G. L., Kosinov A. D., Semenov A. N., Yatskikh A. A. Experimental and numerical investigation of controlled disturbances development from two sources in supersonic boundary layer // *Adv. Aerodynamics.* 2019. Vol. 1. P. 14-1–14-13.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Абрамов М. А.	17	Бухтияров А. В.	6, 35	Евдокимов Ю. Ю.	71
Абрамов Ф. А.	3	Бычков О. П.	202	Ежов А. Ю.	130
Акимов М. А.	6, 108	Васильев А. А.	30	Епихин А. С.	150
Александров В. Ю.	163	Веденеев В. В.	37, 45, 79	Еремин А. В.	73
Алексеев М. С.	8	Вермель В. Д.	71, 86	Ерофеев Е. В.	184
Алексеев С. А.	10	Витошкин И. Е.	39	Жихарева И. В.	10
Алпацкий Н. С.	12, 132	Вишняков О. И.	41, 136	Зайцев А. М.	75
Аль-Музайкер М.	14	Воеводин А. В.	34	Зайцев В. Ю.	49, 124, 177
Амелюшкин И. А.	3	Войтишина М. С.	10	Зайчик Л. Е.	221
Амирьянц Г. А.	16	Волков А. В.	34	Занин Б. Ю.	12, 132
Ананян М. В.	163	Галиахметова Л. Х.	58	Зарипов Д. И.	122
Арефьев К. Ю.	17	Ганиев О. Р.	86	Засько Г. В.	77, 99, 143
Архангельский Ю. А.	221	Ганченко Г. С.	8, 43	Захаров В. С.	138
Архипов В. А.	18, 26	Ганяк О. И.	86	Золоторёв Н. Н.	18
Афанасенков А. А.	19	Гареев Л. Р.	45, 79	Зубавичус Я. В.	6, 35
Афанасьев А. О.	97	Герцель И. С.	47, 61	Иванова Н. А.	14, 59, 146
Афанасьев Д. В.	130	Гильманов А. М.	49, 177	Иванов А. В.	57
Афанасьев Л. В.	227	Глотов О. Г.	23	Иванов О. О.	45, 79
Ашуров Д. А.	21, 45, 79	Гольшева П. С.	53	Ильченко М. А.	176
Баймова Ю. А.	169	Гольшев А. А.	39, 51, 174	Илюшин Б. Б.	7
Балунов К. А.	195	Гонцова Л. Г.	126	Иордан Ю. В.	81
Басалаев С. А.	18	Гончар А. В.	55, 93	Ипатов М. С.	154
Башкатов В. В.	154	Горынин Г. Л.	57	Казанцева Н. В.	148
Белоусова Н. С.	23	Гребнев И. И.	43	Каменских А. А.	83, 85, 87
Бервицкий А. В.	104, 188	Громько Ю. В.	136	Каприлевская В. С.	12, 132
Беркон Г. А.	24	Губкин А. С.	59	Кармушин С. Р.	89
Богданов С.	26	Гудыма Т. С.	69	Кашкаров А. О.	6
Бойко А. В.	28, 65, 77, 99, 143	Гулов М. А.	47, 61	Клюев Н. А.	91
Бондарь Е. А.	115	Гуськов А. В.	23	Клюшнев Н. В.	67
Борискин А. А.	30	Гуськов О. В.	138	Клюшников В. А.	93
Борисова В. Г.	32	Давыдович Д. Ю.	63	Коновалова А. Ю.	6
Бородина Ю. Н.	100	Демёхин Е. А.	8, 160	Кононова А. А.	73
Босняков И. С.	34	Демиденко Н. В.	65	Копьев В. Ф.	202
Будовский А. Д.	119	Демьянко К. В.	67, 77, 99, 143	Корнев Ю. В.	86
Бунтин Д. А.	41	Денисов С. Л.	154	Корняков А. А.	179
Бурков М. В.	73	Дик Д. В.	69	Косинов А. Д.	95, 227
Бут И. И.	150	Дубовой А. В.	104	Косяков В. П.	111

Кочарин В. Л.	95, 227	Мыктыбеков Б.	130	Сахарова А. И.	100
Кравченко А. В.	163	Мымрин В. А.	49, 177, 124	Северин А. С.	7
Крайнов А. Ю.	139	Навоев А. А.	195	Семенов Н. В.	95, 227
Криницын М. Г.	97	Нечепуренко Ю. М.	77, 99, 143	Семянова В. Е.	156
Крутский Ю. Л.	69	Никитин М. Г.	49, 177	Сибирякова Н. А.	174
Крысина А. С.	83	Никитин Н. В.	37	Сидоренко А. А.	102, 119
Кубяк А. Е.	156	Носов Ю. О.	85	Сидоров Р. С.	176
Кузнецова С. А.	99	Обайд Г. Л. О.	146	Силантьев В. А.	32
Кулер К. Э.	6	Окулов А. В.	148	Синицын А. В.	130
Курилов В. Б.	100	Ольберг И. И.	160	Скворцова В. Д.	49, 177
Кутепова А. И.	102	Орлова С. М.	150	Слитинская А. Ю.	100
Кухарский А. В.	150	Остапчук А. А.	152	Соловьев А. А.	55
Куянова Ю. О.	104, 188	Остриков Н. Н.	154	Сорокин С. А.	221
Лаврук С. А.	106	Остроухов А. А.	163	Станкевич Ю. А.	188
Левченко Л. К.	108	Павленко А. М.	12, 132	Стеблинкин А. И.	184
Легостаев Д. Ю.	111	Пальчиков Д. С.	130	Студенников А. А.	6
Линдеров М. Л.	113	Пантелеев С. А.	122	Суворова Ю. С.	179
Лисица В. В.	213	Панькова А. П.	87	Судаков В. Г.	179
Литвинцев А. С.	115	Паршин Д. В.	104, 156, 188	Сулкарнаев Ф. Р.	146
Лопато А. И.	117	Пахаруков Ю. В.	167	Сыроватень А. А.	180
Лузгин Н. К.	119	Первунин К. С.	7	Темербеков В. М.	182
Лукьянов А. А.	122	Перфильева К. Г.	18	Тен К. А.	6
Лукьянов А. И.	124	Петошин В. И.	49, 124, 177	Тимофеева А. Д.	184
Луппов А. А.	130	Поливанов П. А.	6, 24, 128	Титов С. А.	86
Любутин П. С.	73	Полякова П. В.	158	Тихвинский Д. В.	188
Максютов А. К.	126	Пономарёв Р. Р.	43, 160	Тлеуленов Р. Р.	139, 190
Маркин В. В.	24, 128	Попов В. А.	8, 43	Толочко Б. П.	6
Медведев А. Е.	53	Прууэл Э. Р.	6	Торопков Н. Е.	193
Мезенцев М. А.	130	Рожнова Е. А.	169	Трифонов И. В.	71
Мельников А. Ю.	134	Рубцов И. А.	6	Тропин Д. А.	180, 182
Мельник Е. А.	12, 132	Рудинский А. В.	163	Туктаров С. А.	195
Меркулова Е. А.	136	Сагун А. И.	165	Угрюмов Р. И.	197
Мерсон Д. Л.	113	Сараев А. А.	35	Урбанский В. А.	200
Минко А. В.	138	Сафаргалиев Р. Ф.	167	Усанина А. С.	18, 26
Митрофанов А. А.	139, 190	Сафина Л. Р.	169	Усов А. В.	71
Моисеева К. М.	190			Фараносов Г. А.	202
Молчанова А. Н.	115			Федосеева А. Э.	204
Мороков Е. С.	141			Филиппов А. А.	61, 69, 206, 223
Мурзаев Р. Т.	58				

Фролов М. В.	209	Чернышев С. А.	202	Широких В. П.	221
Халеменчук В. П.	6	Чесноков А. А.	217	Шукало В. И.	156
Химуля В. В.	210	Чупахин А. П.	156	Шупик П. А.	223
Хмель Т. А.	19	Чуфистов А. П.	124	Щеглов А. С.	179
Хотяновский Д. В.	102	Шабиев Ф. К.	167	Юсупова О. С.	148
Чедрик А. В.	195	Шелистов В. С.	43, 160	Ядренкин М. А.	225
Чепеленкова В. Д.	213	Шемахин А. Ю.	219	Яковец М. А.	154
Чернова А. А.	215	Шехтман Л. И.	6	Яцких А. А.	95, 227

СОДЕРЖАНИЕ

Абрамов Ф. А., Амелюшкин И. А. Снижение сопротивления трения жидкости на рельефной поверхности, покрытой слоем смазки	3
Акимов М. А., Поливанов П. А. Численное исследование динамического срыва потока при малых числах Рейнольдса	6
Алексеев М. С., Попов В. А., Ганченко Г. С., Демёхин Е. А. Влияние асимметрии сложного электролита на электроосмотическое течение в микроканалах	8
Алексеев С. А., Войтишина М. С., Жихарева И. В. «Виртуальная Птица» — комплексный подход к междисциплинарному моделированию бортового оборудования и систем самолетов транспортной категории в интересах разработки, испытаний и сертификации	10
Алпацкий Н. С., Павленко А. М., Мельник Е. А., Занин Б. Ю., Каприлевская В. С. Изучение влияния распределенной силовой установки на структуру обтекания трапециевидной модели крыла	12
Аль-Музейкер М., Иванова Н. А. Конвективный перенос частиц и формирование паттернов на подложках: влияние кривизны мениска смачивания	14
Амирьянц Г. А. С. А. Христианович — ученый-универсал	16
Арефьев К. Ю., Абрамов М. А. Вопросы физического и математического моделирования двухфазных течений	17
Архипов В. А., Басалаев С. А., Золоторёв Н. Н., Перфильева К. Г., Усанина А. С. Влияние восходящего потока воздуха на гравитационное осаждение кластера капель	18
Афанасенков А. А., Хмель Т. А. Численное моделирование гибридной детонации в водородных взвешях с частицами алюминия с применением параллельного программирования	19
Ашуров Д. А. Оптимальные возмущения в круглых затопленных струях	21
Белусова Н. С., Глотов О. Г., Гуськов А. В. Исследование влияния добавок-модификаторов на характеристики горения алюминизированных топлив	23
Беркон Г. А., Маркин В. В., Поливанов П. А. Влияние элементов рамы квадрокоптера на динамические нагрузки, возникающие на винте	24
Богданов С., Архипов В. А., Усанина А. С. Влияние концентрации поверхностно-активного вещества на закономерности всплытия пузырьков	26

Бойко А. В. Полосчатые структуры в пристенных течениях	28
Борискин А. А., Васильев А. А. Препятствие как инициатор возбуждения детонации затухающими ударными волнами	30
Борисова В. Г., Силантьев В. А. Исследование обтекания отсека крыла с шайбами и оценка их геометрических параметров	32
Босняков И. С., Воеводин А. В., Волков А. В. Расчет обтекания модели гражданского самолета с посадочной конфигурацией крыла, пилоном и мотогондолой	34
Бухтияров А. В., Сараев А. А., Zubavichus Я. В. ЦКП «СКИФ»: проектируемые станции и будущие возможности	35
Веденев В. В., Никитин Н. В. Абсолютная неустойчивость затопленных струй	37
Витошкин И. Е., Гольшев А. А. Применение синхротронного излучения при исследовании металлокерамического покрытия	39
Вишняков О. И., Бунтин Д. А. Определение амплитудно-частотной характеристики датчиков термоанемометра	41
Ганченко Г. С., Шелистов В. С., Пономарёв Р. Р., Попов В. А., Гребнев И. И. Моделирование движения ионоселективных микрочастиц в разбавленных FENE-электролитах при неравновесном электрофорезе	43
Гареев Л. Р., Ашуров Д. А., Веденев В. В., Иванов О. О. Экспериментальное исследование алгебраического механизма роста возмущений в затопленной струе	45
Герцель И. С., Гулов М. А. Исследование влияния предварительного нагрева на структуру металлокерамического покрытия, полученного с помощью аддитивных технологий	47
Гильманов А. М., Скворцова В. Д., Зайцев В. Ю., Мымрин В. А., Никитин М. Г., Петошин В. И. Результаты исследования характеристик самолета короткого взлета и посадки на больших углах атаки методом испытания динамически подобной свободнолетающей модели и динамически подобной модели на шарнирном подвесе в аэродинамической трубе	49
Гольшев А. А. Влияние типа керамики на свойства титано-матричного композита, создаваемого методом лазерного выращивания	51
Гольшева П. С., Медведев А. Е. Физико-математическое моделирование течения воздуха в полном бронхиальном дереве человека при обструктивных и хронических болезнях легких	53
Гончар А. В., Соловьев А. А. Ультразвуковые и металлографические исследования зоны термического влияния сварного соединения из углеродистой стали при усталости	55

Горынин Г. Л., Иванов А. В. Математическое моделирование напряженного состояния криволинейных стержней методом асимптотического расщепления.....	57
Губкин А. С., Иванова Н. А. Прямое численное моделирование однофазного течения в поровом пространстве горной породы	59
Гулов М. А., Герцель И. С., Филиппов А. А. Лазерная наплавка металлокерамического износостойкого покрытия на никелевой основе ...	61
Давыдович Д. Ю. Оценка влияния состава пластика на процессы его утилизации.....	63
Демиденко Н. В., Бойко А. В. Расчеты двухпараметрических профилей скорости пограничного слоя для течений на вытянутом сфероиде и скользящем крыле	65
Демьянко К. В., Ключнев Н. В. О немодовой временной неустойчивости течения Пуазейля в трубе эллиптического сечения....	67
Дик Д. В., Гудыма Т. С., Филиппов А. А., Крутский Ю. Л. Гетерогенные материалы B_4C-CrB_2 , синтезированные с использованием нановолокнистого углерода.....	69
Евдокимов Ю. Ю., Вермель В. Д., Трифонов И. В., Усов А. В. Удовлетворение критериев подобия в конструкциях крупномасштабных аэродинамических моделей лопастей несущих винтов вертолетов.....	71
Еремин А. В., Бурков М. В., Кононова А. А., Любутин П. С. Механическое поведение слоистых композитов с гибридным армированием	73
Зайцев А. М. Энергетическая модель устойчивости подкрепленной панели с учетом совместности изгибных деформаций	75
Засько Г. В., Бойко А. В., Демьянко К. В., Нечепуренко Ю. М. О вычислении пространственных оптимальных возмущений двумерных пограничных слоев.....	77
Иванов О. О., Гареев Л. Р., Ашуров Д. А., Веденеев В. В. Экспериментальное определение роста немодального возмущения в круглой струе	79
Иордан Ю. В. Утилизация образцов отделяющихся элементов ракет-носителей с помощью высокоэнергетических материалов	81
Каменских А. А., Крыгина А. С. О влиянии толщины и характера сопряжения защитной полимерной прослойки на контакт с металлической поверхностью	83
Каменских А. А., Носов Ю. О. Экспериментальные исследования и процедура численной идентификации моделей поведения смазочных материалов	85

Каменских А. А., Панькова А. П. Анализ совместного действия вертикальной и горизонтальной нагрузок от мостового пролета на работу контактного узла опорной части.....	87
Кармушин С. Р. Нестационарные течения вязкоупругой жидкости в модели Джонсона — Сигалмана с несколькими временами релаксации	89
Клюев Н. А. Анализ результатов расчета дальнего вихревого следа за самолетом с помощью разложения по динамическим модам	91
Клюшников В. А., Гончар А. В. Кинетика изменения акустической анизотропии в нержавеющей аустенитных сталях при одноосном растяжении и разных температурах	93
Кочарин В. Л., Яцких А. А., Косинов А. Д., Семенов Н. В. Влияние радиуса притупления передней кромки на течение в пограничном слое под воздействием n -волны.....	95
Криницын М. Г., Афанасьев А. О. Структура, фазовый состав и свойства композиционных керамических и металлокерамических материалов, полученных методом экструзионного аддитивного производства.....	97
Кузнецова С. А., Бойко А. В., Демьянко К. В., Засько Г. В., Нечепуренко Ю. М. Топологические методы идентификации линий отрыва и присоединения в пограничных слоях.....	99
Курилов В. Б., Бородина Ю. Н., Сахарова А. И., Слитинская А. Ю. Расчетно-экспериментальные исследования по совершенствованию взлетно-посадочной механизации перспективных пассажирских самолетов	100
Кутепова А. И., Хотяновский Д. В., Сидоренко А. А. Численное моделирование развития возмущений от периодического теплового источника в сверхзвуковом пограничном слое.....	102
Куянова Ю. О., Дубовой А. В., Бервицкий А. В., Паршин Д. В. Модели разной размерности в задаче оптимизации геометрических характеристик сосудистого анастомоза	104
Лаврук С. А. Исследование взаимодействия гетерогенной детонации с пористой вставкой конечной длины	106
Левченко Л. К., Акимов М. А. Исследование продольного возмущенного движения самолета в окрестности критических углов атаки	108
Легостаев Д. Ю., Косяков В. П. Применение нейронных сетей и теории фильтрации для восстановления поля проницаемости и расчета добычи нефти.....	111

Линдеров М. Л., Мерсон Д. Л. Магниевые сплавы систем Mg-Zn-Ca и Mg-Zn-Y медицинского назначения	113
Литвинцев А. С., Молчанова А. Н., Бондарь Е. А. Прямое статистическое моделирование поверхностных каталитических реакций с учетом неполной аккомодации энергии рекомбинации.....	115
Лопато А. И. Численное исследование распространения детонационной волны в неоднородной среде в системе координат фронта волны	117
Лузгин Н. К., Будовский А. Д., Сидоренко А. А. Применение метода PSP для исследования структуры трансзвукового течения в прямоугольном канале	119
Лукьянов А. А., Пантелеев С. А., Зарипов Д. И. Мгновенный локальный отрыв потока при отрицательных значениях параметра Клаузера.....	122
Лукьянов А. И., Зайцев В. Ю., Мыррин В. А., Петрошин В. И., Чуфистов А. П. Использование струй воздушных винтов для улучшения взлетно-посадочных характеристик самолета	124
Максютов А. К., Гонцова Л. Г. Вопросы обеспечения отрывных течений жидкости в модельном эксперименте.....	126
Маркин В. В., Поливанов П. А. Исследование динамических нагрузок на винте постоянного шага на режиме косої обдувки	128
Мезенцев М. А., Мыктыбеков Б., Сеницын А. В., Ежов А. Ю., Пальчиков Д. С., Луппов А. А., Афанасьев Д. В. Создание и применение конструкционных керамических композиционных материалов в силовой установке авиационного двигателя нового поколения	130
Мельник Е. А., Павленко А. М., Алпацкий Н. С., Занин Б. Ю., Каприлевская В. С. Исследование влияния органов управления и фюзеляжа на структуру обтекания модели летательного аппарата с прямым крылом	132
Мельников А. Ю. Течение потока газа с трением в цилиндрическом канале	134
Меркулова Е. А., Вишняков О. И., Громыко Ю. В. Исследование теплообмена чувствительного элемента датчика термоанемометра при числах Маха от 0,2 до 2	136
Минко А. В., Захаров В. С., Гуськов О. В. Интенсификация смешения в каналах различной конфигурации при помощи тел малого сопротивления	138

Митрофанов А. А., Тлеуленов Р. Р., Крайнов А. Ю. Горение пропановоздушной смеси в замкнутом цилиндрическом канале при зажигании с двух торцов	139
Мороков Е. С. Ультразвуковая визуализация процессов микромеханического разрушения в объеме нетканых материалов, применяемых в регенеративной медицине	141
Нечепуренко Ю. М., Бойко А. В., Демьянко К. В., Засько Г. В. Оптимальные возмущения стационарных и периодических решений динамических систем.....	143
Обайд Г. Л. О., Иванова Н. А., Сулкарнаев Ф. Р. Изменение смачиваемости и абсорбционных свойств биоугля при его залегании в почве.....	146
Окулов А. В., Юсупова О. С., Казанцева Н. В. Деаллоинг в жидком металле для синтеза микронанопористых высокоэнтропийных материалов биомедицинского назначения	148
Орлова С. М., Епихин А. С., Бут И. И., Кухарский А. В. Разработка средств трехмерного моделирования обледенения в различных условиях	150
Остапчук А. А. Структурная и механическая составляющие при решении задач геомеханики разломов	152
Остриков Н. Н., Башкатов В. В., Денисов С. Л., Яковец М. А., Ипатов М. С. Актуальные задачи в области разработки эффективных ЗПК для авиадвигателей.....	154
Паршин Д. В., Шукало В. И., Кубяк А. Е., Семянова В. Е., Чупахин А. П. Моделирование биомеханики лыжного хода и механики скольжения	156
Полякова П. В., Галияхметова Л. Х., Мурзаев Р. Т. Константы упругости двумерных углеродных материалов при малых деформациях.....	158
Пономарёв Р. Р., Ольберг И. И., Шелистов В. С., Демёхин Е. А. Шаблоны поведения заряженных частиц, взвешенных в электролите, в микроканалах с пористой стенкой	160
Рубцов И. А., Бухтияров А. В., Зубавичус Я. В., Кашкаров А. О., Коновалова А. Ю., Купер К. Э., Прууэл Э. Р., Студенников А. А., Тен К. А., Толочко Б. П., Халеменчук В. П., Шехтман Л. И. Станция для исследования быстропротекающих процессов на источнике синхротронного излучения ЦКП СКИФ	162
Рудинский А. В., Александров В. Ю., Остроухов А. А., Кравченко А. В., Ананян М. В. Сравнение моделей турбулентности для расчетов параметров потоков с начальной закруткой.....	163

Сагун А. И. Разработка термопластичного фидстока для 3D-печати из оксида алюминия.....	165
Сафаргалиев Р. Ф., Пахаруков Ю. В., Шабиев Ф. К. Движение нанокластеров нефти в капилляре пористой среды	167
Сафина Л. Р., Рожнова Е. А., Баймова Ю. А. Исследование механических свойств поверхности Ni, покрытой композитом графен/Ni: атомистическое моделирование.....	169
Северин А. С., Илюшин Б. Б., Первунин К. С. Анализ структуры турбулентности пузырьковой струи: старшие статистические моменты скорости.....	171
Сибирякова Н. А., Гольшев А. А. Исследование процессов формирования металлокерамического материала VT6 — SiC DMD-методом лазерной наплавки.....	174
Сидоров Р. С., Ильченко М. А. Расчетно-экспериментальное определение характеристик акустического волновода для ударноволновых сигналов	176
Скворцова В. Д., Гильманов А. М., Зайцев В. Ю., Мымрин В. А., Никитин М. Г., Петошин В. И. Определение параметров динамически подобной свободнолетающей модели самолета	177
Суворова Ю. С., Корняков А. А., Судаков В. Г., Щеглов А. С. Расчетные исследования обтекания модели прямого крыла на закритических углах атаки	179
Сыроватень А. А., Тропин Д. А. Численное исследование борсодержащих смесей за ударными волнами.....	180
Темербеков В. М., Тропин Д. А. Численное моделирование взаимодействия газовой детонации с конечноразмерными пластинами	182
Тимофеева А. Д., Стеблинкин А. И., Ерофеев Е. В. Особенности математического моделирования электрогидравлических сервоприводов.....	184
Титов С. А., Вермель В. Д., Ганяк О. И., Ганиев О. Р., Корнев Ю. В. Изменение механических характеристик инфузионного эпоксидного связующего вследствие его структуризации при диспергировании углеродных нанокомпонентов.....	186
Тихвинский Д. В., Куянова Ю. О., Бервицкий А. В., Станкевич Ю. А., Паршин Д. В. Динамическое наблюдение изменения гемодинамических и морфологических характеристик малых церебральных аневризм.....	188
Тлеуленов Р. Р., Митрофанов А. А., Моисеева К. М. Особенности горения углеметановоздушной смеси при закрутке потока	190

Торопков Н. Е. Разработка фидстоков для 3D-печати из псевдосплава W-Cu	193
Туктаров С. А., Балунов К. А., Навоев А. А., Чедрик А. В. Глобально-локальный подход к топологической оптимизации с ограничениями на напряжения	195
Угрюмов Р. И. Аналитическое решение антиплоской задачи моментной теории упругости со стесненным вращением	197
Урбанский В. А. Исследование объединенной системы подготовки газа для наддува и для газореактивных сопел спасаемой первой ступени ракеты-носителя	200
Фараносов Г. А., Копьев В. Ф., Чернышев С. А., Бычков О. П. О взаимном дополнении физического и численного эксперимента в аэроакустике турбулентных струй.....	202
Федосеева А. Э. Микроструктурный дизайн 9–12 % Cr мартенситных сталей и пути увеличения их сопротивления ползучести	204
Филиппов А. А. Зависимость модулей упругости наночастиц диоксида кремния от размера.....	206
Фролов М. В. Исследование гелиевой проницаемости кремнеземных микросфер	209
Химуля В. В. Комплексное изучение процессов деформирования и фильтрации в породах-коллекторах подземных хранилищ газа в условиях сложного нагружения с применением методов рентгеновской томографии.....	210
Чепеленкова В. Д., Лисица В. В. Применение метода дискретных элементов для оценки прочностных характеристик материала при одноосном нагружении.....	213
Чернова А. А. Влияние гравитационного расслоения фаз на эффективность водогазового воздействия на нефтяные пласты	215
Чесноков А. А. Катящиеся волны и автоволновые структуры в течениях жидкости и газа	217
Шемахин А. Ю. Математическое моделирование потока ВЧ-плазмы пониженного давления для цилиндрической вакуумной камеры в условиях динамического вакуума	219
Широких В. П., Архангельский Ю. А., Зайчик Л. Е., Сорокин С. А. Выбор необходимой степени подвижности пилотажного стенда для моделирования сложного пространственного положения и сваливания	221
Шупик П. А., Филиппов А. А. Исследование влияния рентгеноконтрастных добавок на механические характеристики углепластиков с добавлением углеродных нанотрубок	223

Ядренкин М. А. Особенности горения субмиллиметрового дугового разряда в магнитном поле.....	225
Яцких А. А., Афанасьев Л. В., Кочарин В. Л., Семенов Н. В., Косинов А. Д. Структура контролируемых возмущений от двух импульсных источников в сверхзвуковом пограничном слое пластины	227
Алфавитный указатель авторов	229

Научное издание

ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Тезисы докладов XVII Всероссийской конференции молодых ученых

26 февраля — 6 марта 2023 г., Новосибирск — Шерегеш

Ответственный за выпуск

С. А. Лаврук

Корректоры:

М. В. Власова, Н. А. Ермакова, Д. И. Ковалёва, Т. А. Маркова

Верстка *А. С. Терешкиной*

Обложка *Е. В. Неклюдовой*

Подписано в печать 12.02.2023.

Формат бумаги 60 × 84/16. Усл. печ. л. 15. Уч.-изд. л. 13,9.

Тираж 50 экз. Заказ № 33.

Издательско-полиграфический центр НГУ
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.



N* Новосибирский
государственный
университет
*НАСТОЯЩАЯ НАУКА

Генеральные спонсоры



Спонсоры



FlowVision



ISBN 978-5-4437-1425-7



9 785443 714257

