



XIX Всероссийская школа-конференция молодых ученых

10–17 марта 2025 года
Новосибирск – Шерегеш
Россия

Тезисы докладов

Новосибирск
2025



ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ
МЕХАНИКИ ИМ. С. А. ХРИСТИАНОВИЧА СО РАН
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. ПРОФ. Н. Е. ЖУКОВСКОГО
КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Т. Ф. ГОРБАЧЁВА

ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ:
ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Тезисы докладов
XIX Всероссийской школы-конференции молодых ученых

10–17 марта 2025 г.,
Новосибирск — Шерегеш

Под редакцией Е. И. Крауса

УДК 532.516 + 532.517 + 534.29

ББК 22.253.3 +22.251

П781

П781 Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии : Тез. докл. XIX Всерос. школы-конф. молодых ученых 10–17 марта 2025 г., Новосибирск — Шерегеш / под ред. Е.И. Крауса; Ин-т теор. и прикл. механики им. С.А. Христиановича СО РАН ; Центр. аэрогидродинам. ин-т им. проф. Н.Е. Жуковского ; Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачёва. — Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2025. — 188 с.

ISBN 978-5-4437-1736-4

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, 2025

© Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, 2025

© Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачёва, 2025

ISBN 978-5-4437-1736-4

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО СЛЕДА НА КРЫЛО СО СТРЕЛОВИДНОЙ ПЕРЕДНЕЙ КРОМКОЙ ПРИ КРИТИЧЕСКОМ УГЛЕ АТАКИ*

Н. С. Алпацкий, А. М. Павленко, Б. Ю. Занин

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

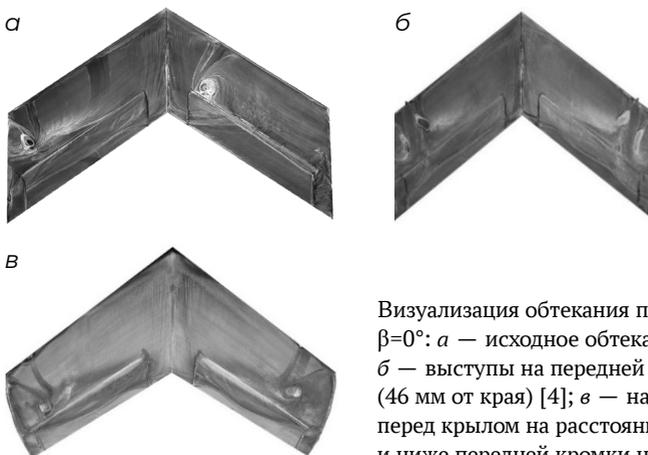
Использование летательных аппаратов в приземном пограничном слое (на малых высотах) активно развивается и вскоре станет неотъемлемой частью повседневной жизни [1]. В этой связи возникает необходимость изучения структуры потока на крыле, поиска способов устранения отрывных течений и увеличения зон ламинарного обтекания, что позволит снизить лобовое сопротивление.

Настоящие исследования являются экспериментальными и были проведены в дозвуковой малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324. Параметры этой трубы и подробное описание можно найти в [2]. Для получения результатов была использована методика, ранее успешно примененная в многочисленных исследованиях, — «саже-масляная» визуализация [3].

Представленные результаты визуализации были получены при критическом угле атаки ($\alpha = 20^\circ$) для данной модели [4], а также при скорости набегающего потока 25 м/с ($Re = 4,4 \times 10^5$). В работе моделировался режим попадания ЛА в турбулентный след. Для этого применялась ворсистая нить в качестве внешнего источника возмущений. Нить натягивалась перед моделью таким образом, чтобы турбулентный след с нее попадал на крыло [5]. Для управления потоком применялись локальные методы воздействия, такие как единичные выступы. Выступы в форме конусов размещались в местах вблизи передней кромки. Эмпирическим путем были найдены эти места, разместив в которых источник возмущений, можно было добиться максимального эффекта на отрывное обтекание.

* Работа была выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2024–2026 гг. (номер гос. регистрации 124021400038-1).

© Алпацкий Н. С., Павленко А. М., Занин Б. Ю., 2025



Визуализация обтекания при угле атаки $\alpha=20^\circ$; $\beta=0^\circ$: *a* — исходное обтекание крыла [4]; *б* — выступы на передней кромке крыла (46 мм от края) [4]; *в* — натянутая нить перед крылом на расстоянии 200 мм и ниже передней кромки на 30 мм

Список литературы

1. Telli K., Kraa O., Himeur Y., Ouamane A., Boumehraz M., Atalla S., Mansoor W. A Comprehensive Review of Recent Research Trends on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) // *Systems*. 2023. Vol. 11. Iss. 8. P. 400. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>.
2. Багаев Г.И., Голов В.К., Медведев Г.В., Поляков Н.Ф. Аэродинамическая труба малых скоростей Т-324 с пониженной степенью турбулентности // *Аэрофизические исследования*. Новосибирск. 1972. Вып. 1. С. 5–8.
3. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента. Ч. 2. Методы и средства аэрофизических измерений. Новосибирск: НГТУ, 2007. 456 с.
4. Alpatskiy N., Pavlenko A., Melnik E., Kaprilevskaya V., Zanin B. Features of the flow structure in the boundary layer of a V-shaped flying wing model with controls and a distributed electric propulsion // *E3S Web of Conferences : XXXIX Siberian Thermophysical Seminar (STS-39)*, (Novosibirsk, 28–31 Aug., 2023). 2023. Vol. 459. P. 03001(5). DOI: 10.1051/e3sconf/202345903001
5. Павленко А.М., Быков А.В., Занин Б.Ю., Катасонов М.М. Изучение обтекания трапецевидной модели малоразмерного БПЛА при попадании в турбулентный след // *Сибирский физический журнал*. 2021. Том 16, № 2. С. 14–28. DOI: 10.25205/2541-9447-2021-16-2-14-28.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСПАРЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА ПРИ СКОРОСТНОЙ И ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ

К. Ю. Арефьев, М. А. Абрамов

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

Работа посвящена исследованию, направленного на изучение движения и испарения полидисперсных капель воды в высокоэнthalпийном воздушном потоке. Рассмотрены теоретические и эмпирические подходы при формировании математической модели нагрева и испарения полидисперсных капель воды с диаметрами 5...100 мкм в потоке воздуха с начальной температурой до 600 К и скоростью до 100 м/с при числах Вебера меньше критических значений.

Разработанная математическая модель учитывает изменение температуры газа при расходе его начальной энтальпии на нагрев и испарение диспергированной жидкости, а также снижение уровня межфазного конвективного теплообмена при начале испарения жидкости и формировании вблизи капель слоя пара.

На основе анализа базы ранее опубликованных и оригинальных экспериментальных данных установлены значения эмпирических коэффициентов для разработанной математической модели. Для этого был разработан специализированный алгоритм обработки экспериментальных данных.

Для валидации математической модели проведено детальное сопоставление расчетных данных с ранее опубликованными экспериментами авторского коллектива, а также других исследователей. Предложенная математическая модель позволяет обеспечить различия между расчетами и экспериментами не более 7 % для скорости капель, не более 9 % для среднего счетного диаметра капель и не более 6 % для среднего объемно-поверхностного диаметра капель, а также дисперсии распределения.

Представленные уравнения и закономерности могут быть адаптированы для различных режимов теплообмена между диспергированными жидкостями и газами, применяемыми в энергетическом машиностроении.

ДИНАМИКА БИДИСПЕРСНОГО ПУЗЫРЬКОВОГО КЛАСТЕРА ПРИ НАЛИЧИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА *

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

Томский государственный университет, Томск

Закономерности пузырьковых течений представляют интерес в целом ряде технологических процессов в различных отраслях промышленности (нефтегазовая, пищевая, химическая, косметическая) [1–2]. Одним из факторов, влияющих на динамику пузырькового двухфазного потока, является сила поверхностного натяжения на границе между газом и жидкостью. В различных технологических процессах для изменения свойств граничной поверхности в дисперсионную среду добавляют поверхностно-активные вещества (ПАВ). В частности, введение ПАВ способствует более эффективному извлечению углеводородов из нефтеносных пластов, улучшению смешивания реагентов и увеличению скорости реакций, стабилизации эмульсий в химических технологиях.

Из анализа литературных данных следует, что наиболее изучены движения одиночных пузырьков и монодисперсных пузырьковых кластеров, состоящих из пузырьков одинакового размера. В реальных технологических системах встречаются, как правило, течения, состоящие из полидисперсных пузырьков. При физическом и математическом моделировании полидисперсных систем затруднительно выделить и изучить отдельные «элементарные» процессы, происходящие на границе раздела фаз и между частицами в потоке. Для бидисперсных систем представляется возможным проанализировать экспериментальные данные по влиянию отдельных «элементарных» процессов на динамику множества частиц в двухфазном потоке.

В настоящей работе рассмотрены методика и результаты экспериментального исследования динамики кластера бидисперсных пузырьков воздуха в жидкости, содержащей ПАВ.

Экспериментальная установка состоит из прозрачной кюветы, наполненной раствором дистиллированной воды с лаурилсульфатом натрия с концентрацией $1,7 \cdot 10^{-3}$ моль/л, устройства для создания бидисперсного кла-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10028, <https://rscf.ru/project/22-79-10028/>.

© Архипов В. А., Богданов С., Усанина А. С., 2025

стера пузырьков [3] и системы визуализации. Принцип работы устройства для получения кластера пузырьков заключается в импульсной подаче воздуха из коллектора, в верхней крышке которого выполнены перфорации, в которых установлены на равноотстоящих расстояниях друг от друга трубки одинакового диаметра и высоты. Каждая из трубок соединена с коллектором через отдельный электропневмоклапан (ЭПК), что позволяет варьировать количество, расположение пузырьков в кластере и конфигурацию кластера пузырьков с помощью запрограммированного модуля управления, задающего время открытия каждого из ЭПК и интервал времени между подачей каждой из n групп пузырьков. Система визуализации включает две высокоскоростные видеокамеры машинного зрения (модель MER2-502-79U3C), расположенные в двух перпендикулярных плоскостях вдоль траектории движения пузырьевого кластера.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены и проанализированы данные по влиянию ПАВ на качественную картину и скорость движения бидисперсного кластера пузырьков. Экспериментально обнаружено, что независимо от наличия ПАВ качественная картина процесса всплытия бидисперсного кластера пузырьков идентична. Кластер распадается на два отдельных монодисперсных кластера на некотором расстоянии h . Далее скорость центра масс каждого из этих кластеров различна. Значения расстояния h и скорости всплытия кластеров определяются диаметром пузырьков D_i их начальной объемной концентрацией C_i в каждом из монодисперсных кластеров, а также наличием ПАВ в жидкой среде. Для условий проведенных экспериментов распад бидисперсного кластера при наличии ПАВ при значении $D_1/D_2 = 0,75$ происходил на расстоянии $h \approx 37$ см, при значении $D_1/D_2 = 0,65$ — на расстоянии $h \approx 17$ см (величина h возрастает по мере увеличения D_1/D_2).

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Архипов В. А. Басалаев С. А., Усанина А. С., Перфильева К. Г., Полечук С. Н., Костюшин К. В. Способ получения пузырьевого кластера заданной конфигурации: Патент 2796910 РФ // 2023. Бюл. № 16. С. 21.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИБРИДНОЙ ДЕТОНАЦИИ ВОДОРОД-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ НАЛИЧИИ СЛОВЕВ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ*

А. А. Афанасенков, Т. А. Хмель

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

Введение. Интерес к изучению детонационных режимов в водород-воздушной среде обусловлен возросшим интересом к данным смесям, как к альтернативному источнику энергии. Что поднимает вопросы взрыво- и пожаробезопасности при хранении и транспортировке данных смесей, а так же вопросы управления детонационными режимами. В данной работе рассматривается один из возможных способов управления детонацией бедной водород-воздушной среды добавкой частиц алюминия.

Физико-математическая модель основывается на уравнениях Эйлера. Горение водорода описывается доработанной моделью приведенной кинетики Бедарева И. А. [1]. Горение частиц алюминия описывается моделью Федорова А. В. [2], расширенной на микронные и субмикронные размеры [3] с учетом испарения и конденсации оксида алюминия [4].

Численная модель. Для расчета газовой фазы использовалась TVD схема Хартена — Лакса, а для частиц — схема Джентри — Мартина — Дэйли. Программный код написан на языке программирования Fortran, распараллеливание производилось на основе библиотеки OpenMP.

Постановка задачи. Рассматривается задача инициирования и распространения ячеистой детонации в плоском канале с гладкими теплоизолированными стенками в гибридной водород-воздушной смеси с частицами алюминия.

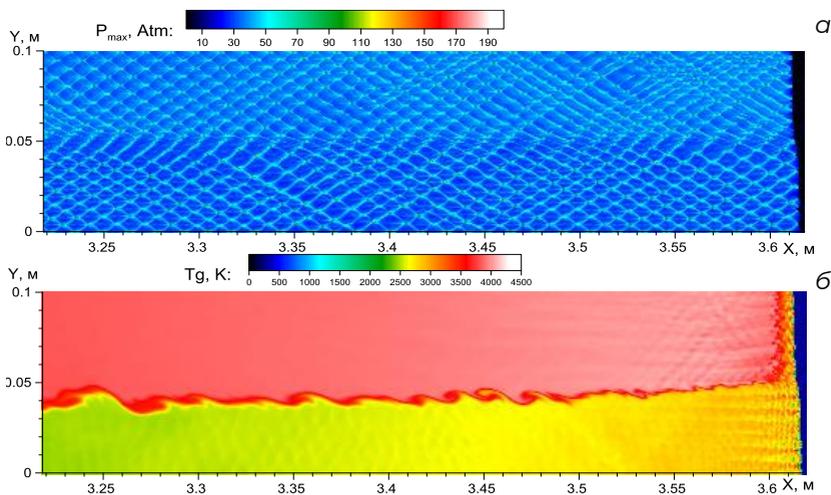
Результаты. В работе исследовалась детонация при различных коэффициентах избытка топлива ($\varphi = 0,4$, $\varphi = 0,6$), а также с однородным и неоднородным распределением частиц алюминия в канале (слоевое с различной толщиной слоя).

Результаты проведенных исследования показали, что наличие слоев газовзвеси алюминия способствует увеличению скорости распространения де-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научно-го проекта № . 24-29-00336.

© Афанасенков А. А., Хмель Т. А., 2025

тонационной волны. На картинах максимальных давлений (см. рисунок, а) наблюдаются искривление фронта детонации и неравномерность ячеистой структуры детонации, а именно нерегулярность ячеек в области смешения слоев. А на картинах мгновенных течений (см. рисунок, б) наблюдаются комбинированные неустойчивости, объединяющие в себе неустойчивость Кельвина — Гельмгольца и неустойчивость Рихтмайера — Мешкова.



Картина максимальных давлений (а) и поле температур картины мгновенных течений (б) гибридной водород-воздушной детонации при $\varphi = 0,6$ и слоем частиц концентрацией $\rho_2 = 300 \text{ г/м}^3$

Список литературы

1. 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. Explos. Shock Waves. 2015. Vol. 51, No. 5. P. 528–539.
2. Хмель Т. А., Федоров А. В. Численное моделирование формирования ячеистой гетерогенной детонации частиц алюминия в кислороде // ФГВ. 2005. Т. 41, № 4. С. 84–98.
3. 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.
4. Афанасенков А. А., Хмель Т. А. Валидация модели гибридной детонации водород-воздушных смесей с частицами алюминия // Челябинский физико-математический журнал. 2024. Т. 9, № 2. С. 177–186.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО МОДЕ СДВИГА

А. С. Бабинцев, П. С. Бессонов, В. Л. Токарь

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский*

Расширение применения полимерных слоистых композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях современных летательных аппаратов является актуальным направлением для многих мировых разработчиков авиационной техники. Особенностью таких материалов является высокая прочность волокон наполнителя при сравнительно низкой прочности матрицы. Такой дисбаланс обуславливает повышенную вероятность появления межслоевых разрушений (расслоений) элементов конструкции из ПКМ в эксплуатации вследствие ударных повреждений различной природы и скорости, усталостных повреждений и других факторов. Расслоения также могут появляться на этапе производства конструкции вследствие непрочности, попаданий инородных предметов, проблем с пропиткой и др. Кроме того, проблема расслоений усугубляется сложностью их обнаружения в эксплуатации [1].

Недопущение катастрофических последствий вследствие разрушения авиационных конструкций, вызванных межслоевыми разрушениями, требует исследований стойкости материала к развитию расслоений (трещиностойкости материала). Одним из наиболее значимых параметров трещиностойкости является вязкость разрушения и усталостные характеристики по моде сдвига (Мода II) [2].

В настоящей работе предложена методика определения усталостных характеристик ПКМ — кривых усталости и кинетических диаграмм разрушения по моде сдвига, основанная на подходах работы [3]. Ключевыми отличиями предложенной методики являются:

1. Учет переменных диссипативных сил в процессе циклического нагружения образца (см. рисунок), что позволяет свести к нулю погрешности в определении длины трещины в начале и конце циклического нагружения.

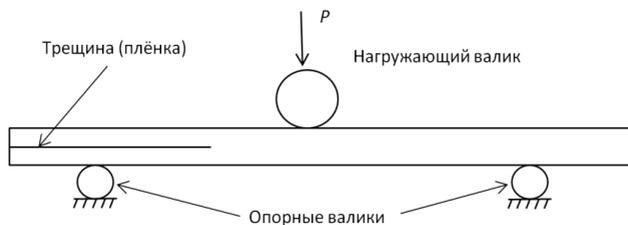


Схема нагружения образца для испытаний при циклическом нагружении по моде сдвига

2. Аппроксимация параметров состояния образца с использованием аналитической функции, что позволяет избавиться от влияния шумов в показаниях датчиков испытательной машины, при этом упрощая обработку результатов нагружения.

3. Для реализации метода разработана программа автоматизированной обработки результатов циклического нагружения, что уменьшает время обработки и вероятность появления ошибок.

Апробация методики выполнена на элементарных образцах из слоистого углепластика со средними значениями толщины 4,17 мм и 13,58 мм общим количеством 47 шт. Проведен анализ результатов применения усовершенствованного метода.

Получаемые с помощью предложенного метода характеристики могут применяться при расчетных оценках долговечности и скорости роста расслоений в конструкциях из слоистых ПКМ.

Список литературы

1. Захаренкова А. Ю., Коновалов В. В., Яштуин А. Г., Стрижиус В. Е., Щербань К. С., Куликов С. В., Федотов М. А. Испытания на усталость и остаточную прочность композитного кессона крыла пассажирского самолета // Учен. зап. ЦАГИ. 2019. Т. L, № 3.
2. Бабинцев А. С., Панков А. В., Токарь В. Л. Подходы и методы для обоснования ресурса конструкции из слоистых полимерных композиционных материалов с расслоениями // Учен. зап. ЦАГИ. 2024. Т. LV, № 5.
3. O'Brien T. K., Johnston W. M., Toland G. J. Mode II Interlaminar Fracture Toughness and Fatigue Characterization of a Graphite Epoxy Composite Material. NASA/TM-2010-216838.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО НЕПРЕРЫВНОМУ ДЕТОНАЦИОННОМУ ГОРЕНИЮ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ

Д. И. Бабушенко, О. В. Гуськов, Р. С. Сидоров

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

В камерах сгорания энергоустановок цилиндрической кольцевой геометрии с непрерывной подачей компонентов топливо-воздушной смеси, как правило, возможна организация процессов устойчивого горения двух типов: турбулентное диффузионное и непрерывно-детонационное, или непрерывная спиновая детонация. Широко известны эксперименты по непрерывной спиновой детонации водородо-воздушной смеси были проведены в Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН [1]. Исследовалась детонация в проточной кольцевой камере диаметром 306 мм. Одним из важных и наглядных результатов является зависимость числа и частоты прохождения детонационных волн от плотности тока.

В представленной работе на основании данных из [1] произведено численное моделирование эксперимента с камерой с цилиндрическим центральным телом. Параметры подаваемых компонентов смеси были рассчитаны согласно закономерностям истечения из ресиверов. Моделирование течения в камере производилось при помощи алгоритма решения осредненных по Фавру уравнений Навье — Стокса для реагирующего газа [2]. Расчеты проводились на двух структурированных сетках, содержащих 7 и 36 млн ячеек соответственно. Увеличение размеров сетки позволило более детально рассчитать течение не только в зоне подачи топлива, но и во всей зоне прохождения детонационных волн, а также учесть неустойчивости течения, возникающие при снижении расхода.

Основным критерием сравнения расчетных и экспериментальных данных была частота прохождения детонационных волн. Одной из важнейших задач численного моделирования был учет изменения в процессе проведения эксперимента расхода и соотношения компонентов, которое обусловило

появление режимов работы камеры с одной, двумя и тремя детонационными волнами.

Показано, что не во всем выходном сечении реализуется сверхзвуковое истечение продуктов сгорания в атмосферу, что, в свою очередь, оказывает влияние на процесс горения. В работе также показано, что важными источником неустойчивости детонационно-волновой структуры при изменении числа волн является окружная неравномерность плотности тока, создаваемая воздушным коллектором. Продемонстрировано удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных по числу детонационных волн и частоте их прохождения.

Список литературы

1. Быковский Ф. А., Ждан С. А., Ведерников Е. Ф. Непрерывная спиновая детонация топливо-воздушных смесей // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, № 4. С. 107–115.
2. Gouskov O. V., Kopchenov V. I., Lomkov K. E., Mnatsakanyan Y. S., Prokhorov A. N., Shutov A. Numerical and experimental investigation of supersonic mixing and combustion // AIAA Paper. 2001. No. 1821.

ВЛИЯНИЕ АТОМОВ ВОДОРОДА НА ПЛАСТИЧНОСТЬ Al-Cu-СПЛАВА ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ: МНОГОМАСШТАБНЫЙ ПОДХОД*

П. А. Безбородова, В. С. Красников, А. Е. Майер

Челябинский государственный университет, Челябинск

Al-Cu сплавы с интерметаллидными включениями интересны как для экспериментального, так и теоретического изучения [1]. Известно, что Al-Cu сплавы обладают высокой стойкостью к водородному охрупчиванию, однако и в их случае водород проникает в объем материала в процессе функционирования, приводя к снижению эксплуатационных характеристик сплава [2].

В работе предложен многомасштабный подход к описанию пластичности, включающий молекулярную динамику (МД), континуальный подход и дискретную динамику дислокаций (ДДД). На уровне МД изучено взаимодействие дислокаций с упрочняющими включениями, насыщенными атомами водорода в разных концентрациях. Показано, что при высокоскоростной деформации реализуются механизмы перерезание или образование петель Орована. Показано, что в процессе накопления пластической деформации даже для прочных включений θ' -фазы происходит переход от образования петель Орована к перерезанию с ростом концентрации атомов водорода. Полученные данные МД обобщены с использованием континуальных моделей, описывающих основные процессы, наблюдаемые на атомном уровне. Для описания механического отклика сплава с большей объемной долей включений предложена схема двумерной дискретной дислокационной динамики. Изучена зависимость напряжения течения сплава от типа, распределения размеров частиц и температуры. Полученные напряжение течения и термическое разупрочнение хорошо согласуются с экспериментами для Al сплавов. Показано, что при фиксированной концентрации легирующих атомов сплавы с малыми упрочняющими включениями демонстрируют более высокую прочность на сдвиг и меньшую склонность к пластической локализации. Расчеты методом МД выполнены с использованием пакета

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках госзадания № № 075-00187-24-04.

© Безбородова П. А., Красников В. С., Майер А. Е., 2025

LAMMPS [3]. Для описания межатомных взаимодействий в системе использован потенциал ВОР [4].

Список литературы

1. Krasnikov V. S., Bezborodova P.A., Mayer A.E. Effect of hydrogen accumulation on θ' precipitates on the shear strength of Al-Cu alloys // *Int. J. Plast.* 2022. Vol. 159. P. 103475.

2. Safyari M., Moshtaghi M., Kuramoto S. Environmental hydrogen embrittlement associated with decohesion and void formation at soluble coarse particles in a cold-rolled Al-Cu based alloy // *Mater. Sci. Eng. A.* 2021. Vol. 799. P. 139850.

3. Plimpton S. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. // *J. Comput. Phys.* 1995. Vol. 117. P. 1-19.

4. Zhou X.W., Ward D.K., Foster M.E. A bond-order potential for the Al-Cu-H ternary system // *New J. Chem.* 2018. Vol. 42. P. 5215-5228.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ТИТАНОМ*

Н. С. Белоусова^{1,2}, О. Г. Глотов^{1,2}, И. В. Сорокин¹

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

²Новосибирский государственный
технический университет, Новосибирск

Диоксид титана в виде частиц нанометрового диапазона размеров обладает превосходными фотокаталитическими свойствами [1]. Различные органические вещества могут быть разрушены на поверхности частиц TiO_2 под действием света с образованием CO , CO_2 , H_2O и так называемого минерального остатка. В 2005 году появилась идея использования аэрозоля TiO_2 для дезактивации загрязнений атмосферного воздуха [2]. Такой аэрозоль может быть получен либо распылением готового фотокаталитического TiO_2 с применением газогенератора или с использованием энергии взрыва [3], [4], либо посредством сжигания порошка титана в воздухе [5–7]. Последний вариант может быть реализован в специально разработанном устройстве — «пиротехническом генераторе TiO_2 ». Практическая реализация концепции требует проведения исследований, как минимум, по двум направлениям, а именно: (1) Изучение свойств оксидного аэрозоля, образующегося при горении частиц титана в воздухе. (2) Разработка смесевых композиций и поиск условий горения, в которых реализуется эффективное превращение титана в оксид с требуемыми свойствами.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию горения паствообразных модельных смесевых композиций с порошком титана, следующих типов: губчатый, обкатанный пористый, оплавленный, сферический. Впервые проведены эксперименты с титаносодержащими композициями при давлении 2–9 МПа и получена зависимость скорости горения от давления, необходимая для проектирования камеры с соплом, предназначенной для выброса горящих частиц титана в воздух в струе продуктов горения модельной композиции.

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 24-29-00474.

© Белоусова Н. С., Глотов О. Г., Сорокин И. В., 2025

Методом EDS проведен анализ продуктов горения. Данные EDS показали высокое содержание кислорода в конденсированных продуктах горения, что может указывать на достаточно полное превращение титана в оксид. В будущем предполагается изучить фотокаталитическую активность TiO_2 полученного в результате горения композиций с титаном и его эффективность по отношению к модельным загрязнителям.

Список литературы

1. Глотов О.Г. Воспламенение и горение частиц титана. Экспериментальные методы исследования и результаты // Успехи физических наук. 2019. Т. 189, № 2. С. 135–171.

2. Weiser V., Neutz J., Eisenreich N., Roth E., Schneider H., Kelzenberg S. Development and characterization of pyrotechnic compositions as counter measures against toxic clouds // Energetic Materials: Performance and Safety. 36th Int. Annual Conf. of ICT & 32nd Int. Pyrotechnics Seminar, June 28 — July 1. Karlsruhe, Germany. 2005. P. 102-1–102-12.

3. Сакович Г.В., Ворожцов Б.И., Кудряшова О.Б., Ворожцов А.Б., Павленко А.А., Архипов В.А., Муравлев Е.В., Ахмадеев И.Р., Ишматов А.Н., Титов С.С. Применение ВЭМ для генерации субмикронного аэрозоля // В кн.: Фундаментальные и прикладные проблемы технической химии: к 10-летию Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН: сборник научных трудов. Новосибирск: Наука, 2011. С. 194–211.

4. Гаенко О.И., Конюхов И.Е., Муравлев Е.В., Кудряшова О.Б., Титов С.С. Распыление дезактивирующих аэрозолей с помощью энергии ВЭМ // Всерос. конф. «Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения»: тезисы докладов. Новосибирск: Сиб. отд-ние РАН, Ин-т гидродинамики. 2023. С. 221. DOI 10.53954/9785604990025_221.

5. Захаренко В.С., Хромова С.А. О возможности использования твердого аэрозоля, получаемого сжиганием в воздухе микрочастиц титана, в ликвидации последствий техногенных катастроф // Экологическая химия. 2006. Т. 15, № 4. С. 226–234.

6. Захаренко В.С., Пармон В.Н., Хромова С.А. Химические и оптические свойства диоксида титана, полученного горением в воздухе микрочастиц титана // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 531–536.

7. Glotov O. G., Zarko V. E. Formation of Nanosized Products in Combustion of Metal Particles // In: Energetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization, and Application. Elsevier, 2016. P. 285–321.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В МУЛЬТИВЕНТИЛЯТОРНОМ СТЕНДЕ

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

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

Малоразмерные беспилотные воздушные судна (БВС) в основном используются в приземных слоях атмосферы, где характерны сложные воздушные течения, сопровождающиеся такими явлениями, как порывы ветра и сдвиг скорости ветра по высоте. Для моделирования таких течений в лабораторных условиях можно использовать мультивентиляторный аэродинамический стенд (рис. 1), который представляет собой набор малоразмерных вентиляторов, расположенных параллельно друг относительно друга. В результате образуется двумерный массив независимо управляемых вентиляторов. При модификации или создании новых БВС необходимо выполнить настройку коэффициентов ПИД регуляторов. Эту процедуру необходимо

выполнять для различных полетных условий, в том числе для условий сильной атмосферной турбулентности. Для решения этой задачи можно использовать мультивентиляторный стенд, который моделирует атмосферную турбулентность.

В работе представлены результаты исследования характеристик мультивентиляторного стенда на возможность моделирования атмосферной турбулентности. Исследования были проведены на одиночной изолированной ячейке мультивентиляторного стенда. Параметры потока измерялись при помощи

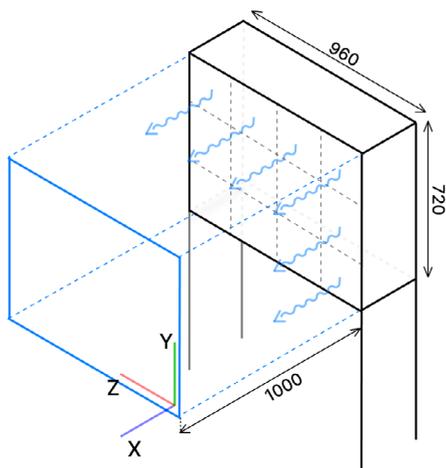


Рис. 1. Схема мультивентиляторного аэродинамического стенда

термоанемометра постоянно сопротивления, ниточный датчик которого располагался в ядре потока, на удалении 1 м от ее выходного сечения.

На рис. 2 представлена зависимость скорости потока U от времени t , где светлой пунктирной линией изображена осциллограмма, сгенерированная программой для моделирования турбулентности, а темной сплошной — скорость потока, зафиксированная термоанемометром. В большинстве случаев видно достаточное совпадение выходных значений скорости потока с управляющей осциллограммой, что позволяет успешно генерировать псевдослучайное воздействие набегающего потока на летательный аппарат, моделируя реальные условия турбулентной атмосферы.

Хорошее совпадение данных можно видеть не только непосредственно на картинах осциллограмм (рис. 2, а), но и на спектрах мощности пульсаций скорости (рис. 2, б).

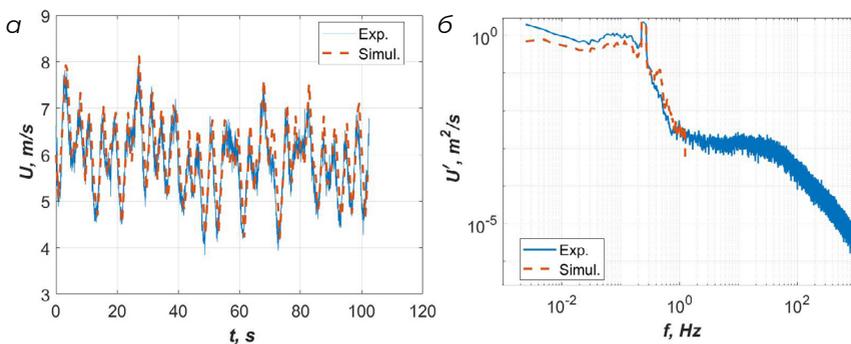


Рис. 2. Осциллограмма скорости потока U от времени t (а) и спектр мощности пульсаций скорости потока (б)

Из полученных данных можно сделать вывод, что моделирование атмосферной турбулентности, при помощи изменения скорости вращения вентиляторов по заданной осциллограмме, осуществляется с частотой до 1 Гц.

Список литературы

1. Berkon G.A., Polivanov P.A. Generation of atmospheric turbulence in a multifan wind tunnel // XXII International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR–2024) (Novosibirsk, 1–5 July 2024): Abstr. Pt. I. Novosibirsk: SB RAS, 2024. P. 11–12. DOI: 10.53954/9785604990131_11.

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДОМ К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ТРЕХМЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ПОМОЩЬЮ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ*

А. В. Бойко, В. И. Бородулин,
А. В. Иванов, С. В. Кириловский,
Д. А. Мищенко, Т. В. Поплавская

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

Дается обзор результатов по задержке ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое стреловидного крыла при использовании рельефов поверхности, состоящих из структурировано расположенных элементов.

Эксперименты проводились в рабочей части малотурбулентной аэродинамической трубы Т-324 ИТПМ СО РАН. Использовалась экспериментальная модель стреловидного крыла, как в работе [1]. Выполнялись тепловизионные измерения на верхней стороне модели при угле атаки $\alpha = -5$. Скорость набегающего потока изменялась в диапазоне 20–45 м/с. Для обнаружения перехода к турбулентности использовалась методика, описанная в [2].

В соответствии с условиями экспериментов были выполнены расчеты в среде ANSYS Fluent. Соответствующая расчетная область представляет собой параллелепипед с помещенным в него стреловидным крылом. Расчеты проводились по методике, описанной в [3].

Расчеты и эксперименты показали, что рассмотренные конфигурации рельефов способны существенно смещать положения начала перехода и турбулентности вниз по течению. С увеличением числа различных элементов рельефа в ряде случаев удается добиться синергетического увеличения эффекта задержки перехода.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 23-19-00644).

© Бойко А. В., Бородулин В. И., Иванов А. В., Кириловский С. В., Мищенко Д. А., Поплавская Т. В., 2025

Список литературы

1. Ivanov A. V., Mischenko D. A. Delay of laminar-turbulent transition on swept-wing with help of sweeping surface relief. AIP Conf. Proc. 2019, Vol. 2125, No. 030041. P. 1-6.
2. Boiko A. V., Ivanov A. V., Borodulin V. I., Mischenko D. A. Quantification technique of transition to turbulence in boundary layers using infrared thermography. Int. J. Heat Mass Transf. 2022, Vol. 183, No. 122065. P. 1-11.
3. 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, Vol. 59. P. 3598-36.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ПРИ ДВУМЕРНОЙ ДИФРАКЦИИ ВОЛН ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ В ДВУХТОПЛИВНЫХ СМЕСЯХ

А. А. Борискин, А. А. Васильев

*Институт Гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

Хорошо известно, что в горючих смесях можно возбудить два предельных самоподдерживающихся режима: дозвуковое ламинарное горение со скоростью распространения порядка 0,5 м/с и стационарная детонация, со скоростью порядка 2–3 км/с для газообразного взрывчатого вещества. Однако между этими двумя предельными режимами существует большое количество нестационарных процессов, с которыми чаще всего и приходится сталкиваться на практике, и которые все еще изучены недостаточно.

Стационарная детонация и ламинарное горение на сегодняшний день хорошо изучены в монотопливных смесях. Целью данной работы является изучение нестационарных процессов в более сложных двухтопливных смесях. Такие процессы возникают в результате дифракции квазистационарной детонационной волны (мгновенного расширения изначального канала) и взаимодействия дифрагирующей волны как со стенками самого канала, так и с находящимся в нем препятствием (рис. 1). Препятствие здесь играет роль дополнительного внешнего инициатора нестационарных волн и обеспечивает двухстадийную схему иницирования. Такая схема была предложена в работе [1], а в [2] обсуждены некоторые ее подробности.

Исследования проводились в квазиплоских каналах, где волна из трехмерной превращается в двумерную, более удобную для исследований. Использование двухтопливных смесей вместо (изучаемых в большинстве работ) монотопливных, позволяет получить слабо изученную бифуркационную ячеистую структуру (в данной ячеистой структуре наблюдается два типа ячеек различных размеров) (рис. 2).

В качестве исследуемых газов использовались стехиометрические смеси ацетилена с закисью азота и кислородом с соотношениями ацетилен/закись азота равными 1:1, 1:2, 1:3 и 1:4. Установлено, что с увеличением доли закиси азота, помимо закономерного роста критического давления инициро-

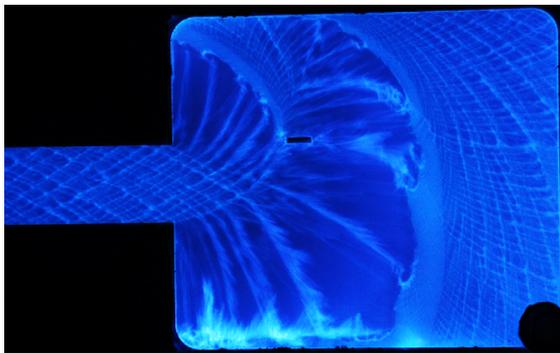


Рис. 1. Фотография дифракции и реиницирования детонации от препятствия

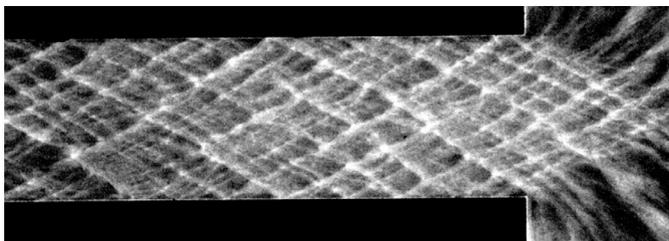


Рис. 2. Фотография бифуркационной ячеистой структуры

вания стационарной детонации, наблюдается изменение в характере переходных процессов: самореиницирование детонации и реиницирование от боковых стенок или препятствия.

Полученные результаты необходимо учитывать при рекомендациях по снижению риска возникновения и развития аварийных ситуаций при работе с горючими газами в условиях реального расположения технологического оборудования в промышленных зданиях и жилых помещениях.

Список литературы

1. Васильев А. А. Вопросы инициирования и его оптимизации // Труды конференции «Успехи механики сплошных сред», Владивосток, 29 сентября — 5 октября 2009 г. С. 103–117.

2. Борискин А. А., Васильев А. А. Возбуждение цилиндрической детонации ослабевающей ударной волной // Физика горения и взрыва. 2023. Т. 59, № 6. С. 123–135. DOI: 10.15372/FGV2022.9248.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕУПАКОВКИ КЛЕТОК ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ ТКАНИ В ЭПИТЕЛИАЛЬНЫХ ЛИСТАХ*

М. Д. Бузмаков, И. В. Красняков

*Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь*

Переупаковка клеток является важным процессом в развитии эпителиальных тканей. Клетки таких тканей выстилают поверхности органов и различных полостей тела, образуя сплошной слой. В процессах развития, восстановления и приспособления к изменениям переупаковка клеток играет ключевую роль [1]. При remodelировании тканей процессы переупаковки способствуют адаптации клеток к различным изменениям, если на них действует механическая нагрузка, либо влияние внешней среды. Переупаковка также способствует и механической интеграции клеток [2]. Эпителиальные ткани остаются устойчивыми к деформациям и сохраняют целостность своей формы после изменений благодаря перестройке контактов между клетками. Переупаковка клеток сопровождает и процессы регенерации после повреждений. На ранних этапах развития эмбриона клетки эпителия формируют структуры будущих органов за счет переупаковки [3].

Для разработки математических моделей эволюции ткани используются два ключевых подхода: континуальный и дискретный. Несмотря на распространенность и относительную простоту реализации, континуальный подход не позволяет учитывать индивидуальную динамику каждой отдельной клетки. Учет изменений клеток довольно важен для описания полной картины эволюции живой материи. Представителями дискретного подхода являются, например, клеточные автоматы, модель Поттса, модель молекулярной динамики и вершинные модели. Последний, по нашему мнению, является наиболее подходящим для математического моделирования поведения эпителиальных тканей. Вершинные модели позволяют достаточно точно описать поведения каждой клетки. Их взаимодействие и формирует эпителиальную ткань, в которой клетки плотно прилегают друг к другу.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-71-01020, <https://rscf.ru/project/23-71-01020/>.

© Бузмаков М. Д., Красняков И. В., 2025

Взаимодействия отдельных элементов системы определяет потенциал, составляющие которого интерпретируются с физической точки зрения [4].

В рамках данной работы была разработана математическая модель процессов переупаковки клеток эпителиальных тканей при механических воздействиях. Она основана на вершинной модели, а также учитывает основные свойства функционирования реальных эпителиальных тканей. Был определен оптимальный параметр интеркаляции для нормального функционирования эпителиальной ткани. При таком параметре интеркаляции ткань демонстрирует способность к адаптации при внешних механических воздействиях. Наблюдается минимизация локальных напряжений и сохранение структурной целостности без разрушений ткани. При этом морфология стремится к энергетически выгодному состоянию. Разработанная математическая модель может быть использована для исследования механических и химических взаимодействий в многоклеточных системах.

Список литературы

1. Herrera-Perez R. M., Kasza K. E. Biophysical control of the cell rearrangements and cell shape changes that build epithelial tissues // *Current opinion in genetics & development*. 2018. Vol. 51. P. 88–95.
2. Lemke S. B., Nelson C. M. Dynamic changes in epithelial cell packing during tissue morphogenesis // *Current Biology*. 2021. Vol. 31, No. 18. P. R1098–R1110.
3. Zallen J. A., Goldstein B. Cellular mechanisms of morphogenesis // *Seminars in cell & developmental biology*. NIH Public Access. 2017. Vol. 67. P. 101.
4. Брацун Д. А., Красняков И. В., Брацун А. Д. Биомеханические модели живой ткани // *Российский журнал биомеханики*. 2023. Т. 27, № 4. С. 50–71.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА БОРА С ДОБАВЛЕНИЕМ ДИБОРИДА ВАНАДИЯ*

Н. Ю. Бурхинова, Д. В. Дик, А. А. Филиппов

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

Карбид бора представляет собой неоксидную керамику, температура плавления которой составляет 2763 °С с выдающимися физико-механическими свойствами, электрическими и высокой химической стабильностью. Однако низкая трещиностойкость и плохая спекаемость таких материалов являются их основными недостатками. Так ожидается, что добавление диборида ванадия способствует устранению данных недостатков [1]. Целью работы является установление закономерности изменения структуры и свойств керамики на основе карбида бора при введении в ее состав диборида ванадия.

В качестве исходных компонентов использовались лабораторно синтезированный карбид бора из простых С и В и V_2O_5 . Порошковую смесь механически обрабатывали в высокоэнергетической планетарной мельнице. Спекание осуществляли горячим прессованием. Диборид ванадия синтезировали *in situ* в процессе горячего прессования карбидоборным восстановлением.

В результате было получено пять серий экспериментальных материалов с различным содержанием диборида ванадия с шагом 5 мол. %. Микроструктура спеченных композита представлена на рис. 1.

Микроструктура полученной керамики представляет собой равноосные зерна карбида бора и однородно распределенные зерна диборида ванадия. Относительная плотность всех образцов превышает 97 %, так как добавление VB_2 способствует уплотнению керамики B_4C в процессе реакции между B_4C и V_2O_5 [2]. Результаты исследования механических характеристик представлены на рис. 2.

Твердость композитов высокая, что типично для плотных материалов (с относительной плотностью свыше 97 %) на основе карбида бора. В образ-

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (номер гос. регистрации: 124021400036-7). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Механика».

© Бурхинова Н. Ю., Дик Д. В., Филиппов А. А., 2025

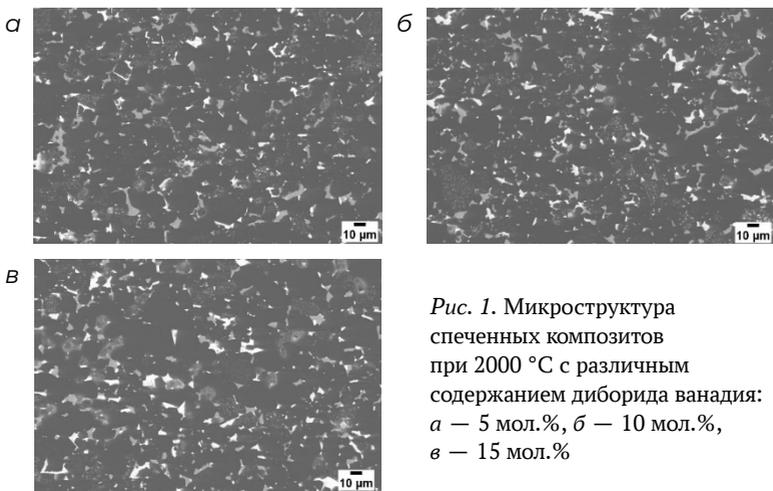


Рис. 1. Микроструктура спеченных композитов при 2000 °С с различным содержанием диборида ванадия: а – 5 мол.%, б – 10 мол.%, в – 15 мол.%

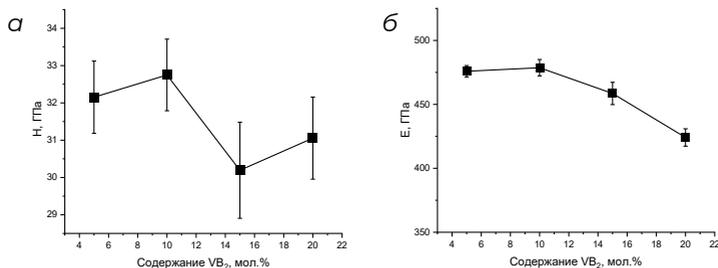


Рис. 2. Твердость (а) и модуль упругости (б) композита V_4C-VB_2

цах с содержанием 5–10 мол.% второй фазы твердость достигает предельных значений (32–33 ГПа). При 15 мол.% VB_2 твердость заметно снижается из-за уменьшения относительной плотности. Максимальные показатели модуля упругости составляют 476–478 ГПа при добавлении 5–10 мол.% VB_2 . Эти высокие показатели обусловлены включением более пластичной фазы и получением мелкозернистой структуры.

Список литературы

1. Domnich V. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress // Journal of the American Ceramic Society. 2011. Vol. 94, No. 11. P. 3605–3628.
2. Xu C. Spark plasma sintering of B4C ceramics: the effects of milling medium and TiB2 addition // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2012. Vol. 30, No. 1. P. 139–144.

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ ТЕПЛОГО ИСТОЧНИКА НА СТРУКТУРУ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ В ЕГО СТЕНКИ*

И. Р. Васнёв, Н. Н. Федорова

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

Прогнозирование тепловых нагрузок на стенки каналов различных технических устройств, функционирующих при высоких температурах и давлениях, необходимо для разработки способов теплозащиты [1]. Моделирование сопряженного теплообмена играет важную роль в прогнозировании тепловых нагрузок, позволяя учитывать взаимосвязь между газодинамическим течением и нагревом твердых тел.

Ранее авторами было проведено моделирование нагрева чувствительных элементов датчиков тепловых потоков (ДТП), расположенных на стенках модельного канала, для различных скоростей потока газа на входе [2, 3]. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными [4] позволило выполнить валидацию расчетной модели в условиях «холодного» течения. Целью настоящей работы является численное исследование прогрета элемента ДТП в условиях высокоскоростного течения с интенсивным тепловыделением.

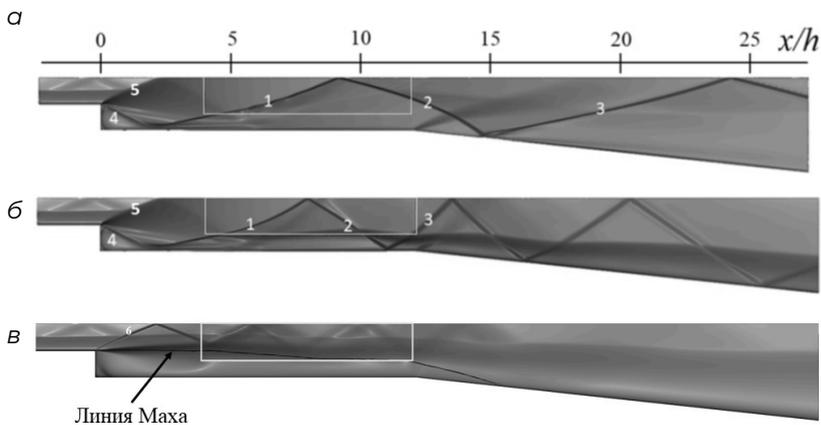
Исследование выполнено в программе Ansys Fluent 2020 R1 на основе нестационарных осредненных по Фавру уравнений Навье — Стокса, дополненных $k - \omega$ SST моделью турбулентности. На входе в канал задано статическое давление $P_{\infty} = 120$ кПа и профили средних и турбулентных параметров, описывающие пограничный слой на стенках канала. В ядре потока температура и скорость равны $T_{\infty} = 800$ К и $U_{\infty} = 1700$ м/с. Моделирование сопряженного теплообмена нестационарного нереагирующего течения проведено с учетом источника энергии, который имитирует тепловыделение

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер гос. регистрации 124021400037-4) с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра НГУ.

© Васнёв И. Р., Федорова Н. Н., 2025

от химических реакций, с медными пластинами, представляющими собой чувствительные элементы ДТП.

Показано, что увеличение мощности теплового источника Q/E , где E — суммарная энтальпия на входе в канал, способствует сдвигу волновой структуры вверх по течению (см. рисунок). При $Q/E = 0,9$ в конце области прямого сечения канала образуется локальная зона отрывного течения. При дальнейшем увеличении теплоподвода отрывная зона за уступом объединяется с локальной отрывной зоной, образуя большую дозвуковую зону, которая сужает эффективное сечение канала. При этом тепловые потоки увеличиваются из-за повышения температуры в пристенной области.



Численные шлирен-поля для случаев без теплового источника (а), с тепловым источником $Q/E = 0,5$ (б), $Q/E = 1$ (в)

В данной работе также рассматривается случай с периодической мощностью источника тепловыделения. Проведен анализ прогрева пластины, расположенной в расширяющейся части канала, при сравнении случаев с периодическим и постоянным источниками тепловыделения, обладающими одинаковой суммарной мощностью. Результаты показали, что при периодическом тепловыделении прогрев пластины происходит более интенсивно. Это связано со смещением места падения скачка уплотнения на стенку перед вверх по потоку перед датчиком. За скачком уплотнения статическая температура в пристенной области, следовательно, и тепловой поток в датчик, возрастают.

Список литературы

1. Polezhaev Yu. V. Modern problems of thermal protection // J. of Engineering Physics and Thermophysics. 2001. Vol. 74, No. 6. P. 1364–1374.
2. Васнев И. Р., Федорова Н. Н. Численное моделирование нагрева стенок экспериментальной модели в сверхзвуковых течениях // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64, № 2. С. 121–126.
3. Васнёв И. Р., Гольдфельд М. А., Федорова Н. Н. Моделирование нагрева чувствительного элемента датчика теплового потока в высокоскоростном течении при переменных входных условиях // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 6. С. 1023–1039.
4. Goldfeld M. Evolution of the ignition and combustion process at high velocity at the channel entrance // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, No. 53. P. 20483–20494.

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВС-РЕАКТОРОВ ТИПА БН

О. Ю. Виленский, М. С. Кутьин, А. В. Рябцов

*АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения
им. И. И. Африкантова», Нижний Новгород*

Активная зона — внутренняя область реакторной установки, в которой содержится ядерное топливо и осуществляется цепная реакция. Активная зона реактора типа БН (быстрый натриевый) представляет собой набор тепловыделяющих сборок (ТВС), сборок защиты, стержней управления защитой (СУЗ) с шестигранными гильзами и отработавших ТВС, находящихся во внутриреакторном хранилище.

Сборки активной зоны реакторов БН при установке в реактор и выгрузке из него могут испытывать различные динамические воздействия, при которых они должны сохранять свою прочность.

При проведении транспортно-технологических операций возможны аварийные ситуации, связанные с падением ТВС с ядерным топливом, которые могут привести к повреждению сборки.

Цель работы — обоснование динамической прочности ТВС с использованием современного аттестованного программного комплекса отечественного производства.

Для этого создана конечно-элементная модель сборки с внутренним наполнением. Проанализированы возможные динамические нагрузки. Определены критерии оценки прочности ТВС. С использованием программного комплекса проведены расчетные оценки напряженно-деформированного состояния ТВС при различных сценариях динамического нагружения. Выполнены оценки прочности ТВС по выбранным критериям. Проведена кросс-верификация отечественного программного комплекса с зарубежным аттестованным программным комплексом.

Определены алгоритмы и выбраны параметры счета при выполнении оценок динамической прочности.

В результате выполненной работы показано, что «свежие» (необлученные) ТВС требованиям динамической прочности при транспортно-технологических операциях и при аварийных ситуациях, связанных с падением ТВС, удовлетворяют.

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ*

И. Е. Витошкин, А. А. Голышев, Н. Ю. Бурхинова

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

Развитие аддитивных технологий открывает возможности получения изделий с необходимыми свойствами поверхности, при этом не затрачивая материал покрытия на изготовление всего объема изделия. В данной работе представлены предварительные исследования в рамках разработки такого процесса для изготовления резца горного бура.

Выращивание покрытия Р6М5 осуществлялось методом прямого лазерного выращивания на установке, включающей иттербиевый волоконный лазер IPG Photonics с длиной волны 1,07 мкм. Для контроля скорости охлаждения в процессе выращивания покрытия получали при подогреве подложки (09Г2С) до 200 и 400 °С, а также при его отсутствии. На данном этапе необходимо исследовать структуру получаемых покрытий. Проводилась оптическая и растровая электронная микроскопия и дюрметрические испытания методом Виккерса.

Результаты исследований показали, что наличие подогрева существенно изменяет процессы кристаллизации при наплавке: он усугубляет карбидную ликвацию в покрытии одновременно с этим снижая неоднородность материала по сечению. При этом с увеличением температуры подогрева увеличивается твердость покрытия и уменьшается ее неоднородность по сечению: при отсутствии подогрева — $761 \pm 55 \text{ HV}_{0,3}$, при подогреве до 200 °С — $815 \pm 47 \text{ HV}_{0,3}$, а при подогреве до 400 °С — $850 \pm 34 \text{ HV}_{0,3}$.

Хотя карбидная ликвация является нежелательным явлением при изготовлении режущих инструментов, повышение твердости при подогреве покрытия может быть более дешевой и технологичной альтернативой термической обработке, которая бы включала в себя выдержку и закалку с 1200 °С, отпуск и обработку холодом, после которых бы были получены наилучшие свойства материала. Учитывая относительно небольшую цену Р6М5 и всего изделия, подогрев может обеспечить более существенный экономический эффект, нежели термическая обработка.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (номер гос. регистрации: 124021500015-1).

© Витошкин И. Е., Голышев А. А., Бурхинова Н. Ю., 2025

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВСПЛЫТИЯ ЛЕГКОЙ СФЕРЫ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ СТОЛБЕ ЖИДКОСТИ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ*

О. А. Власова

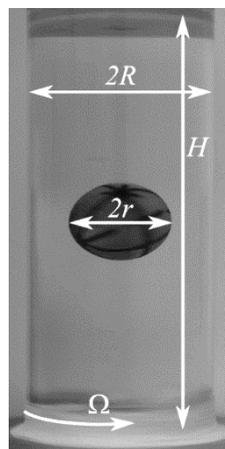
Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь, лаборатория вибрационной гидромеханики

Работа посвящена исследованию динамики легкой сферы, всплывающей в равномерно вращающейся цилиндрической полости с жидкостью. Экспериментально изучается динамика сферы в зависимости от длины полости. Настоящее исследование развивает классическую задачу о сопротивлении, испытываемом сферой, которая движется в маловязкой жидкости во вращающемся цилиндре конечной длины [1–2].

Экспериментальная установка состоит из цилиндрической полости высотой H и радиусом R , равномерно вращающейся вокруг вертикальной оси (см. рисунок). Полость заполнена водой. Внутри полости помещена легкая сфера радиусом r . Радиус сферы равен 1,2 см, радиус полости 2,6 см. Высота полости устанавливается в диапазоне от 6,0 до 22,5 см. Скорость вращения полости варьируется в диапазоне 5–10,5 об/с.

Ранее проведенные эксперименты показали, что скорость подъема тела уменьшается с ростом частоты вращения кюветы независимо от вязкости жидкости. В то же время с ростом вязкости жидкости скорость подъема сферического тела увеличивается [3]. Экспериментальные исследования показали, что в изученном диапазоне параметров продольное движение тела согласуется с теоретическими расчетами и приближается к ним с ростом безразмерной частоты.

В настоящей работе показано, что в канале конечной длины скорость всплытия зависит от расстояния до торцов полости: вблизи торцов,



Экспериментальная установка

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 24-71-00094).

© Власова О. А., 2025

на расстоянии, сравнимом с диаметром сферы, скорость продольного движения тела несколько уменьшается. Обнаружено, что при фиксированной частоте вращения полости скорость всплытия (сопротивление, испытываемое сферой) увеличивается (уменьшается) с увеличением длины полости. Проводится сравнение с теоретической работой [4], в которой показано, что уменьшение сопротивления с увеличением длины полости для фиксированного значения безразмерной частоты связано с увеличением толщины слоя Стюартсона.

Список литературы

1. Moore D. W., Saffman P. G. The rise of a body through a rotating fluid in a container of finite length // *J. of Fluid Mechanics*. 1968. Vol. 31, No. 4. P. 635–642.
2. Maxworthy T. The observed motion of a sphere through a short, rotating cylinder of fluid // *J. of Fluid Mechanics*. 1968. Vol. 31, No. 4. P. 643–655.
3. Kozlov V., Zvyagintseva E., Kudymova E., Romanetz V. Motion of a light free sphere and liquid in a rotating vertical cylinder of finite length // *Fluids*. 2023. Vol. 8, No. 2. P. 49.
4. Ungarish M. The drag on a rising sphere along the axis in a short rotating cylinder of fluid: revisiting the data and theory // *J. of Fluid Mechanics*. 2024. Vol. 979. P. A30.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ТИТАНОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ*

И. С. Герцель^{1,2}, А. Г. Маликов¹

¹*Институт теоретической и прикладной механики*

им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

В настоящее время классические технологии производства и обработки сплавов на основе титана подходят к пределу повышения физико-механических характеристик, в связи с чем существует необходимость в разработке новых подходов к созданию композиционных материалов.

Одним из важных материалов в авиационной промышленности является титановый сплав ВТ-6, однако материал не может эксплуатироваться в условиях повышенных температур в силу подверженности сплавов к износу [1]. Для решения поставленной задачи используется методика армирования керамическими частицами. Варьируя энергетические параметры в процессе метода прямого лазерного выращивания на базе иттербиевого волоконного лазера IPG до 3 кВт (1,07 мкм), можно сосредоточиться на химических реакциях в композите, тем самым найти термически-стабильное структурно-фазовое состояние наплавленного композита. Такой подход приводит к созданию изделия с увеличенным сроком эксплуатации и повышенной износостойкостью [2, 3].

Однако количественного описания фазового состава в настоящее время не было получено и для решения данной задачи в данной работе используется метод дифракции рентгеновских лучей, генерируемых источником синхротронного излучения (СИ), позволяющее локально исследовать структуру и фазовый состав композита в объеме.

В данной работе используется титановый порошок ВТ-6 и частицы керамики В₄С в массовом соотношении 9:1. Для исследования микроструктуры используются методы электронной микроскопии.

* Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 124021500015-1) ИТПМ СО РАН.

© И. С. Герцель, А. Г. Маликов, 2025

Для точного определения фазовых соединений, было проведено исследование с помощью СИ на ускорительном комплексе ВЭПП-3 ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН в геометрии Дебая — Шеррера.

Для выявления возможных фазовых включений использовалась база данных Springer Materials, а данные о структурных параметрах брались в виде CIF файлов из библиотеки Materials Project [4]. Количественный фазовый анализ осуществлялся методом полнопрофильного анализа Ритвелда в программном обеспечении GSAS-II [5]. Основным показателем уточнения служил параметр R_w , показывающий отклонение смоделированной кривой от экспериментальной дифракционной картины.

В результате исследования, были получены следующие данные о фазовом составе композита в зависимости от параметра энергии E , представленные в таблице.

Фазовый состав матрицы в зависимости от режима лазерной наплавки

Образец		Подложка Ti-6Al-4V	$E = 20,1$ Дж/мм ²	$E = 12,9$ Дж/мм ²
Фаза R_w (%)	R_w (%)	7,34	6,01	5,9
a — Ti		92,1	50,9	77,9
b — Ti		7,9	2,2	3,3
TiC		–	17,9	8,8
TiB		–	29,0	10,9

Таким образом вариация параметра E существенно влияет на фазовый состав матрицы (прирост в 30 % TiB+TiC при $E = 20,1$ Дж/мм²). Лазерная наплавка при использовании режима с $E = 12,9$ Дж/мм² позволяет сохранить состав матрицы приближенный к составу подложки, тем самым сохраняя пластичность изделия.

Список литературы

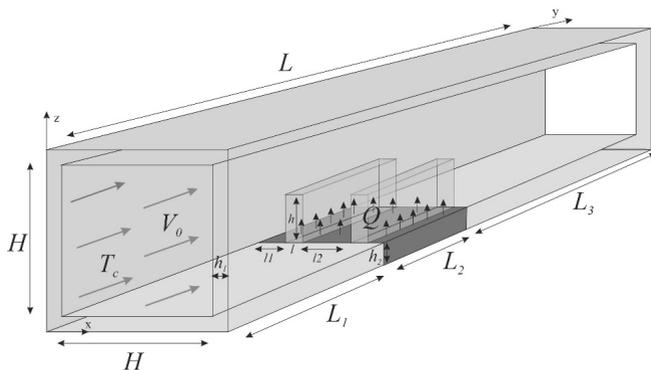
1. Jia L. et al. Accelerated Diffusion Phenomenon in Ti-B4C System and its Influence on the Resulting Composites // J. Mater. Eng. Perform. Springer US, 2023. Vol. 32, No. 4. P. 1974–1983.
2. Xiu Z. et al. Microstructure and Mechanical Properties of Core-Shell B4C-Reinforced Ti Matrix Composites // Materials (Basel). 2023. Vol. 16, No. 3. P. 2–11.
3. Fomin V.M. et al. Creation of a Heterogeneous Material Based on the Titanium Alloy and Titanium Boride By Selective Laser Melting // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2021. Vol. 62, No. 5. P. 752–759.
4. Jain A. et al. Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation // APL Mater. 2013. Vol. 1, No. 1. P. 11002.
5. Toby B., Dreele R. GSAS-II: the genesis of a modern open-source all-purpose crystallography software package // J. Appl. Crystallogr. 2013. Vol. 46. P. 544–549.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОЙ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В КАНАЛЕ С НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И РЕБЕРНОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ*

Н.С. Гибанов

Томский государственный университет, Томск

В данной работе представлены результаты численного моделирования смешанной конвекции в трехмерном канале квадратного сечения с теплопроводными стенками и с нагревательным элементом потсоюзного объемного епловыделения. В качестве охлаждающей среды были рассмотрены воздух и вода, а также в качестве материала охлаждающих ребер были рассмотрены сталь, алюминий и медь. Охлаждающая жидкость считается несжимаемой, ньютоновской с постоянными теплофизическими свойствами и удовлетворяющей приближению Буссинеска. В начальный момент времени среда в канале покоится, температура в стенках канала, ребрах и внутри источника тепловыделения одинакова. Нагревательный элемент располагается на нижней стенке канала, на его поверхности находятся теплоотводящие ребра. Схематически область решения представлена на рисунке.



Область решения

* Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 24-71-00082).

© Гибанов Н.С., 2025

Система дифференциальных уравнений в частных производных в безразмерных преобразованных переменных вектор завихренности-вектор скорости, описывающая процессы сопряженной смешанной конвекции в пространственном прямоугольном канале с нагревательным элементом с постоянным объемным тепловыделением может быть представлена в следующем виде [1, 2]:

Для охлаждающей жидкости:

$$\frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{\Omega} - (\bar{\Omega} \cdot \nabla) \bar{V} = \frac{\nabla^2 \bar{\Omega}}{\text{Re}} + \frac{Ra}{\text{Pr} \cdot \text{Re}^2} \bar{M}, \quad \bar{M} = \left\{ \frac{\partial \Theta}{\partial Y}, -\frac{\partial \Theta}{\partial X}, 0 \right\}$$

$$\text{rot} \bar{\Omega} = -\nabla^2 \bar{V},$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \Theta = \frac{\nabla^2 \Theta}{\text{Pr} \cdot \text{Re}},$$

Для теплоотводящих ребер и стенок канала:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{a_s/a_f}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^2 \Theta$$

Для источника тепловыделения:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{a_{hs}/a_f}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \nabla^2 \Theta + q$$

В начальный момент времени среда в канале покоится и безразмерная температура равна 0,0:

$$\bar{V}(X, Y, Z, 0) = 0; \quad \bar{\Omega}(X, Y, Z, 0) = 0; \quad \Theta(X, Y, Z, 0) = 0.5$$

Метод решения представленной системы уравнений подробно описан в работе [1].

Список литературы

1. Gibanov N. S., Sheremet M. A. Numerical simulation of conjugate mixed convection in 3D channel with heat-generating flat element and symmetrical solid two-fin system // *Symmetry*. 2023. Vol. 15, No. 7. Art. 1467.
2. Gibanov N. S., Hussain M., Sheremet M. A. Three-dimensional heat transport and fluid flow in a channel with heat-generating source and heat removal ribs // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025. Vol. 161, Art. 108552.

ВЛИЯНИЕ ТИПА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВАННЫ РАСПЛАВА ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ*

А. А. Голышев

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

Введение. Лазерные технологии (сварка, наплавка и др.) активно внедряются в производство и активно используются в высокотехнологических отраслях: авиастроении, ракетостроении и других [1–3].

Управление параметрами, влияющими на физические процессы при лазерной обработке, позволяет контролировать поведение «ванны» расплава. В работе [4] показано, что, контролируя геометрию «ванны» расплава, можно непосредственно устанавливать взаимосвязь задаваемых параметров и микроструктуры.

Во время применения лазерных технологий на производстве могут возникнуть затруднения, такие как конденсат или сварочный дым, однако основной сложностью в создании качественного изделия (сварной шов, наплавка) может стать кислород. Поэтому используются защитный газ, который подается непосредственно к зоне плавления вместе.

В данной работе проведены исследования влияния типа газа (аргон и гелий) на структурно-фазовый состав алюминиевого сплава после лазерной обработки.

Список литературы

1. Фомин В. М., Брусенцева Т. А., Маликов А. Г. и др. Влияние параметров лазерного воздействия на формирование ванны расплава металлокерамической смеси В4С — Тi-6Al-4V // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63, № 2 (372). С. 104–116.
2. L.Thijs. Microstructure and texture of metal parts produced by selective laser melting: Dissertation, KU Leuven, Belgium. 2014.
3. Киселева Т. А., Голышев 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. Маликов А. Г., Голышев А. А., Витошкин И. Е. Современные тенденции лазерной сварки и аддитивных технологий (обзор) // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64, № 1 (377). С. 36–59.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (номер гос. регистрации: 124021500015-1).

© Голышев А. А., 2025

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЫХАНИЯ ЧЕЛОВЕКА*

П. С. Голышева, А. Е. Медведев

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

Без процесса дыхания невозможно представить нормальное функционирование организма. Строение дыхательных путей имеет сложную древовидную структуру, состоящую из миллиона бронхов, которые на выходе переходят в альвеолы. Количество бронхов насчитывает 2^{23} бронхов. В связи с этим создание полной модели бронхиального дерева является очень сложной и трудоемкой задачей.

Одной из важных проблем здравоохранения являются болезни легких, каждый третий человек страдает от какого-либо заболевания дыхательной системы.

Данная работа посвящена созданию полного аналитического бронхиального дерева и изучению процессов, происходящих в нем (дыхание, теплообмен в бронхах, оседание аэрозольных форм лекарственных средств и антропогенных веществ в бронхиальном дереве человека).

В рамках данной работы были проведены серии численных трехмерных расчетов течения воздуха в бронхиальном дереве человека. Полученные результаты были сопоставлены с экспериментальными данными, представленными в работе [1]. В работе [1] был разработан специальный гибкий зонд, оснащенный 6 датчиками температуры. Этот зонд вводили в трахеобронхиальное дерево людей, что позволило фиксировать температуру на различных участках — от голосовой щели до дистальных бронхов, при разных условиях вдыхания воздуха. Сопоставление экспериментальных данных и трехмерных расчетов показало хорошее согласование.

Также в рамках данной работы подробно описывается оседание частиц в бронхиальном дереве человека [2]. Благодаря численным расчетам были установлены закономерности осаждения капель лекарственного аэрозоля

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (номер гос. регистрации: 124021400036-7).

© Голышева П. С., Медведев А. Е., 2025

в легких человека в зависимости от размера, времени и интенсивности вдоха.

Список литературы

1. McFadden E. R., Pichurko B. M., Bowman H. F., Ingenito E., Burns S., Dowling N., Solway J. Thermal mapping of the airways in humans // J. of Applied Physiology. 1985. Vol. 58, No. 2. P. 564–570.

2. Medvedev A. E., Golysheva P. S. Simulation of air motion in human lungs during breathing. Dynamics of liquid droplet precipitation in the case of medicine drug aerosols // Mathematical Biology and Bioinformatics. 2022. Vol. 17, No. 2. P. 422–438.

НОВЫЙ МЕТОД СОРТИРОВКИ МОД НЕУСТОЙЧИВОСТИ*

Н. В. Демиденко, А. В. Бойко

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

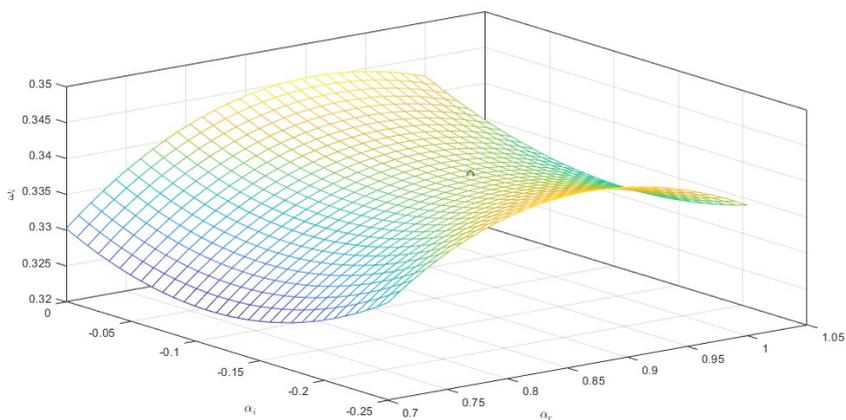
При решении задач линейной устойчивости часто требуется отслеживать одну из мод решения, например уравнения Орра — Зоммерфельда, при непрерывном изменении параметров. При решении задач на собственные значения матричными методами возникает проблема сортировки и «отслеживания» выбранной моды, так как порядок следования собственных значений, выдаваемых конкретным численным решателем, обычно произволен [1]. Как правило, отбор требуемой моды делается на основе некоторых «кинематических» соображений. Так, если известно, что имеется лишь одно нарастающее возмущение, то в области неустойчивости во времени только у него мнимая часть частоты будет находиться в верхней полуплоскости [2]. При решении задачи усиления возмущений в пространстве, когда такой подход не применим (из-за наличия возмущений, распространяющихся вниз и вверх по потоку [3]) иногда используется прием, основанный на априорных оценках фазовых скоростей ведущих мод [4]. Комбинация этих методов помогает при наличии нескольких мод неустойчивости, когда требуется определить по отдельности области их нарастания в пространстве частот, волновых чисел и чисел Рейнольдса [5].

Однако, при необходимости отслеживания мод не только в области усиления, но и затухания [6, 7], когда ведущая в области неустойчивости мода может перестать быть таковой, а отклонение фазовой скорости от априорных оценок для области усиления – стать значительным, эти методы становятся ненадежными. Данная проблема обсуждалась в [8], где был предложен метод, позволяющий оставаться на одном и том же листе Римановой поверхности, описанной дисперсионным соотношением, при изменении волновых чисел; однако этот метод весьма сложен в реа-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 23-19-00644).

© Демиденко Н. В., Бойко А. В., 2025

лизации и все равно может давать сбои, если несколько мод оказываются расположены близко к другу.



Поверхность — мнимая часть частоты ω_i в зависимости от волнового числа $\alpha = \alpha_r + i\alpha_i$ и отмеченная на ней седловая точка

Предлагается новый метод отбора мод, лишенный недостатков кинематических методов. Результат построенной поверхности коэффициентов нарастания при решении задачи пространственно-временной неустойчивости для модельного отрывного профиля, предложенного в [9], в зависимости от изменения волновых чисел и седловая точка показаны на рисунке. Также алгоритм был протестирован на профилях из двухпараметрического семейства автомодельных профилей, описанных в [10].

Список литературы

1. Boiko A. V., Nechepurenko Yu. M. Technique for the numerical analysis of the riblet effect on temporal stability of plane flows // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2010. Vol. 50, No. 6. P. 1055–1070.
2. Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В. Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях. М.: РХД, 2006.
3. Tumin A., Reshotko E. Spatial theory of optimal disturbances in boundary layers // Physics of Fluids. 2001. Vol. 13, No. 7. P. 2097–2104.
4. Lin C. C. On the stability of two-dimensional parallel flows. I. General theory // Quarterly of Applied Mathematics. 1945. Vol. 3, No. 2. P. 117–142.
5. Бойко А. В., Кулик В. М. Устойчивость пограничного слоя плоской пластины над монолитными вязкоупругими покрытиями // ДАН. 2012. Т. 445. № 3. С. 283–285.

6. Gaster M. A rapid method of calculating N-factors for estimating transition position // RTO-MP-AVT-111 / 2004. P. 8.1–8.12.
7. Берс А. Пространственно-временная эволюция абсолютных и конвективных плазменных неустойчивостей // Основы физики плазмы. Ред. А. А. Галеев, Р. Судан. М.: Энергоатомиздат, 1984. Т. 2. С. 267–330.
8. Suslov S.A. Numerical aspects of searching convective/absolute instability transition // Journal of Computational Physics. 2006. Vol. 212, No. 1. P. 188–217.
9. Avanci M.P., Rodríguez D., Alves L. S. de B. A geometrical criterion for absolute instability in separated boundary layers // Physics of Fluids. 2019. Vol. 31, No. 014103.
10. Gaster M. A two-parameter family of laminar boundary layer profiles on swept wings // AIAA. Paper No. 2008–4335.

ГРАДИЕНТ МИКРОСТРУКТУРЫ КЕРАМИКИ B_4C-CrB_2 *

Д. В. Дик, Н. Ю. Бурхинова, А. А. Филиппов

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

Карбид бора обладает высокой твердостью и низкой плотностью, что позволяет использовать его в различных областях промышленности [1]. Однако, низкие показатели вязкости разрушения и прочности ограничивают его области применения.

Добавление спекающих более пластичных добавок позволяет повысить вязкость разрушения керамики из B_4C . Кроме того, управление внутренней структурой за счет применения пластичных добавок позволяет обеспечить большую эффективность использования при высокоскоростном нагружении. Одним из видов структурирования керамики является получение градиентных материалов [2]. Градиент концентрации пластичной добавки может быть слоистым с явными границами раздела слоев и монотонным с размытыми границами перехода, однако оценка эффективности керамики в зависимости от типа градиента не была проведена.

В связи с этим возникает необходимость исследования влияния факторов получения керамических материалов на возможность получения градиента микроструктуры и тип градиента. В данной работе рассматривается влияние температуры горячего прессования на структуру слоистых материалов B_4C-CrB_2 .

Порошки для получения слоистых образцов керамики с матрицей из карбида бора с добавкой дихорида хрома засыпались в пресс форму по следующей схеме (рис. 1).

Шихты для порошков рассчитывались на требуемую мольную концентрацию до-

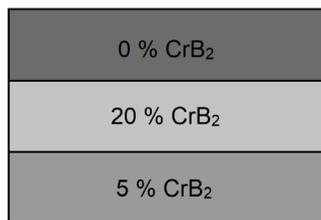


Рис. 1. Схема первоначальной засыпки композитных порошков

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (номер гос. регистрации: 124021400036-7). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Механика».

© Дик Д. В., Бурхинова Н. Ю., Филиппов А. А., 2025

бавки, получающуюся в результате карбидоборного восстановления оксида хрома в присутствии углеродного материала с высокой удельной поверхностью. Температуры горячего прессования образцов составили 0,77; 0,79 и 0,81 от температуры плавления карбида бора. Полученная микроструктура образцов представлена на рис. 2.

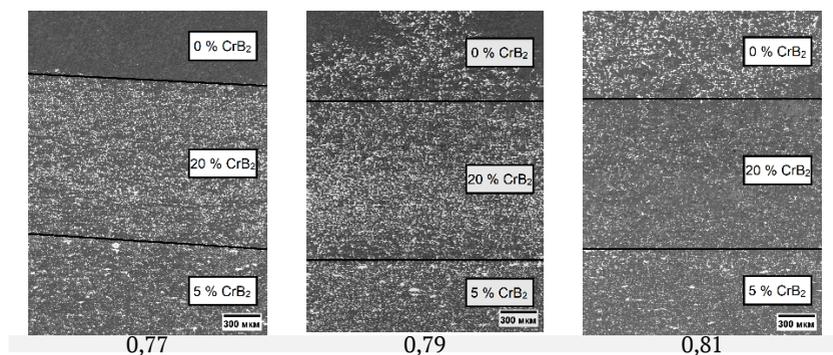


Рис. 2. Микроструктуры слоистых образцов при различных относительных температурах горячего прессования

Диффузия более светлых частиц CrB_2 в слой 0 % с большой пористостью идет на всю его высоту. Она начинается при 0,77 температуры плавления карбида бора. При 0,81 температуры плавления карбида бора диффузия внутрь слоя 0 % проходит полностью, при этом наблюдается градиент концентрации внутри слоя — от границы со слоем донором до границы образца концентрация монотонно снижается.

Слой 20 % при диффузии из него диборида хрома разделяется на подслои с меньшей концентрацией CrB_2 и повышенной пористостью.

В слой 5 % диффузия сильно ограничена тем, что в слое 5 % изначально присутствующий диборид хрома уже закрыл большинство пор. При 0,79 плавления карбида бора глубина проникновения порядка нескольких сотен микрон, а при 0,81 — 300–500 мкм.

Список литературы

1. Thevenot F. Boron Carbide — A Comprehensive Review // Journal of the European Ceramic Society. 1990. Vol. 6. P. 205–225.
2. Dimitrov D., Schreve K., De Beer N. Advances in three dimensional printing — state of the art and future perspectives // Rapid Prototyping Journal. 2006. Vol. 12, No. 3. P. 136–147

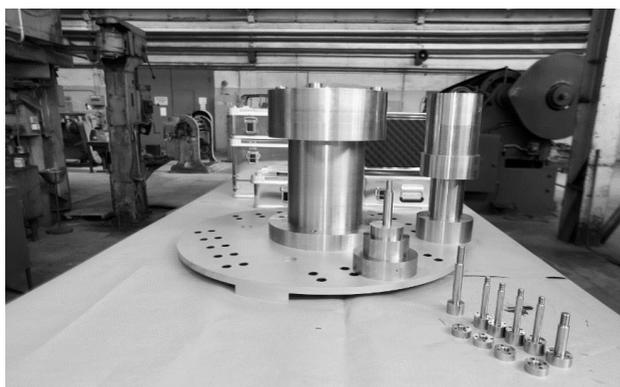
ЭТАЛОННЫЕ МЕРЫ КООРДИНАТ ЦЕНТРА МАСС И МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ

О. В. Довыденко, А. И. Самойленко, В. Д. Чуднова

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский*

Для поверки стан­дов для измерений характеристик геометрии масс в ЦАГИ созданы специальные эталоны (см. рисунок), которые представляют собой набор многозначных мер и предназначены для воспроизведения одновременно трех единиц величин — массы, координат центра масс (далее — ЦМ) и моментов инерции (далее — МИ) [1]. Все эталонные меры, имеют форму, образованную простыми телами вращения (цилиндрами). При поверке стан­да несколько эталонных мер закрепляют на его измерительной платформе, образуя при этом конфигурации, воспроизводящие величины в контрольных точках диапазона измерений стан­да. Предложенная конструкция защищена патентом РФ [2].

Математическая модель эталонов разработана на базе уравнений для нахождения центра тяжести объема однородного твердого тела,



Эталонные меры массы, координат центра масс и моментов инерции

а также аналитических формул для вычисления МИ цилиндра и теоремы Гюйгенса — Штейнера о параллельных осях с применением метода разбиения на конечные части и метода отрицательных масс. При анализе модели измерений выявлены и оценены источники погрешностей эталонов, связанных с применяемым материалом (неоднородность, магнитные свойства), качеством изготовления (отклонения формы и расположения, способ и качество обработки поверхности), внешними влияющими факторами (температура окружающей среды), взаимодействием с объектом измерений (деформации при наклонах эталона в процессе поверки, базирование на поверяемом стенде). По результатам анализа в модель измерений введены элементы, учитывающие влияние неоднородности материала, погрешностей изготовления и температурного линейного расширения, сформулированы рекомендации по выбору допусков на размеры и требования к качеству поверхности [3].

В рамках работы созданы эталоны (см. таблицу), методики их поверки МП 4.28.013-2020, МП 4.28.026-2022, методики поверки стендов МП 4.28.001-2015, МП 4.28.027-2022. Разработаны технические требования к эталонам. Результаты применены при утверждении типа стендов для ФГУП «ВНИИА» и АО «НПО Лавочкина» (регистрационные номера 62420-15, 72575-18, 87444-22).

В рамках инновационного проекта «Эталон НКМ» (ЦАГИ) в 2024 г. получены первые серийные образцы эталонных мер, а в 2025 г. планируется утверждение типа эталонных мер серийного производства и их изготовление для нужд атомной и космической промышленности.

**Утвержденные эталоны массы,
координат центра масс и моментов инерции**

Эталон, регистрационный номер	Масса	Координата ЦМ	МИ
Эталон стенда МЦИ-1200М1, 3.1.АЗО.0252.2015 (ВНИИА)	24...1193 кг	37...1232 мм	0,1...552,8 кг·м ²
НКМ-50, 81928-21 (ЦАГИ)	1...57 кг	13...555 мм	0,15...7,4 кг·м ²
НКМ-500, 86973-22 (АО «НПО Лавочкина»)	10...547 кг	10...1767 мм	-
Пределы допускаемой погрешности	$\delta = 0,0025...0,5 \%$	$\Delta = 0,2...1,0 \text{ мм}$	$\delta = 0,3...0,5 \%$

Список литературы

1. Довыденко О.В., Самойленко А.И., Петроневич В.В. Система метрологического обеспечения прослеживаемости измерений характеристик геометрии масс // Измерительная техника. 2020. № 12. С. 28–34. DOI: org/10.32446/0368-1025it.2020-12-28-34.

2. Патент № 2722962 Российская Федерация, МПК G01M 1/10 (2006.01) / Способ определения погрешности стенда для измерения характеристик геометрии масс изделий и устройство для его осуществления: № 2019135946: заявл. 08.11.2019: опубл. 05.06.2020/ 20 с.

3. Хижняк С.Ю., Довыденко О.В., Самойленко А.И. Стандартизация методики измерений скорости воздушного потока в промышленных АДТ малых дозвуковых скоростей // КИМИЛА 2023. Мат-лы V отраслевой конф. по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов. 2023. С. 249–257.

АТТРАКТОРЫ ВНУТРЕННИХ И ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН: ВОЛНОВАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ЗАМКНУТЫХ ОБЛАСТЯХ*

Е. В. Ерманюк

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

Исследование волновых процессов во вращающейся и стратифицированной жидкости является важной частью гео- и астрофизической гидродинамики [1]. Внутренние и инерционные волны удовлетворяют специфическому дисперсионному соотношению, в которое входит частота возмущающего воздействия и направление распространения волн, но не входит масштаб длины. С этим обстоятельством связано большое разнообразие форм волновых движений (моды, пучки), явление фокусировки при отражении от наклонной стенки, существование нетривиальных замкнутых конфигураций волновых пучков (волновых аттракторов) в замкнутых областях [2, 3], ряд ключевых особенностей развития неустойчивости волн по механизму триадного резонанса [4]. Основные особенности наблюдаемых спектров внутренних волн могут быть объяснены в рамках теории слабой волновой турбулентности в неограниченных областях [5]. В случае инерционных волн подобный подход не позволяет описать формирование медленной геострофической компоненты течения, идентификация механизма энергетической подпитки данной моды движения активно обсуждается в литературе [6].

В докладе рассмотрен обзор современного состояния исследований развития волновой турбулентности в замкнутых областях, заполненных стратифицированной или вращающейся жидкостью. Особое внимание уделено постановкам задач, допускающим существование волновых аттракторов, в которых возможно наблюдение каскадов триадных волновых взаимодействий [7, 8], нетривиальных крупномасштабных азимутальных структур и зональных течений [9–12]. В ряде случаев в установках малого масштаба удается воспроизвести крупномасштабные структуры, представляющие большой интерес с точки зрения гео- и астрофизической ги-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 23-41-00090).

© Ерманюк Е. В., 2025

дродинамики [13]. Исследование нетривиальной азимутальной структуры течений во вращающейся и стратифицированной жидкости [9–12] требует дальнейшего развития методики обработки данных [8, 14], получаемых в экспериментах при возникновении режимов с развитой волновой турбулентностью.

Список литературы

1. Davidson P.A. Turbulence in Rotating, Stratified and Electrically Conducting Fluids. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
2. Maas L.R.M., Benielli D., Sommeria J., Lam F.P.A. Observations of an internal wave attractor in a confined stably stratified fluid // *Nature*. 1997. Vol. 388. P. 557–561.
3. Rieutord M., Georgeot B., Valdetaro L. Wave attractors in rotating fluids: a paradigm for ill-posed Cauchy problems // *Physical Review Letters*. 2000. Vol. 85. P. 4277.
4. Dauxois T., Joubaud S., Odier P., Venaille A. Instabilities of internal gravity wave beams // *Annual Review Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 50. P. 131–156.
5. Lvov Y.V., Tabak E.G. Hamiltonian formalism and the Garrett-Munk spectrum of internal waves in the Ocean // *Physical Review Letters*. 2001. Vol. 87 (16). P. 168501.
6. Lam H, Delache A, Godefert F.S. Supply mechanisms of the geostrophic mode in rotating turbulence: interactions with self, waves and eddies // *Journal of Fluid Mechanics*. 2023. Vol. 971. A10.
7. Scolan H., Ermanyuk E., Dauxois T. Nonlinear fate of internal waves attractors // *Physical Review Letters*. 2013. Vol. 110. 234501.
8. Brouzet C., Ermanyuk E., Joubaud S., Subgatullin I., Dauxois T. Energy cascade in internal wave attractors // *Europhysics Letters*. 2016. Vol. 113. 44001.
9. Boury S, Sibgatullin I, Ermanyuk E, et al. Vortex cluster arising from an axisymmetric inertial wave attractor // *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. Vol. 926. A12.
10. Subbotin S., Shmakova N., Ermanyuk E., Kozlov V. Stewartson layer instability and triadic resonances in rotating sphere with oscillating inner core // *Physics of Fluids*. 2022. Vol. 34. 064103.
11. Subbotin S., Shmakova N., Kozlov V., Ermanyuk E. Nonlinear regims of internal wave attractors generated by a precessing lid: zonal flows and Rossby waves // *Physics of Fluids*. 2023. Vol. 35. 074110.
12. Pacary C., Dauxois T., Ermanyuk E., Metz P., Moulin M., Joubaud S. Observation of inertia-gravity wave attractors in an axisymmetric enclosed basin // *Physical Revue Fluids*. Vol. 8 (10), 104802.
13. Gizon R.H., Cameron Y., Bekki A. C., et al. Solar inertial modes: Observations, identification, and diagnostic promise // *Astronomy and Astrophysics*. 2021. Vol. 652. L6.
14. Yarom E., Sharon E. Experimental observation of steady inertial wave turbulence in deep rotating flows // *Nature Physics*. 2014. Vol. 10. P. 510–514.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПАССИВНОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ РУЛЕВОГО ГИДРОАГРЕГАТА

Е. В. Ерофеев, А. И. Стеблинкин

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский*

В работе представлено описание программно-математической модели электрогидравлического рулевого привода (ЭГРП) аэродинамического органа управления самолета, находящегося в пассивном демпфирующем режиме (состоянии), а также результаты моделирования такого пассивного гидродемпфера при различных скоростях перемещения выходного звена под действием внешней силы, включая режимы страгивания, и при различной температуре рабочей жидкости.

Для различных конфигураций и конструктивных исполнений (параллельная и последовательная схемы дросселя с щелевыми и цилиндрическими отверстиями) клапана выбора режимов привода в модели, разработанной в программном пакете MATLAB/Simulink, реализованы различные формы зависимости коэффициента объемного расхода μ от реализуемых чисел Рейнольдса в протекающем через демпфирующие отверстия потоке жидкости. Показано, что коэффициент демпфирования привода Kd , являющийся коэффициентом пропорциональности в квадратичной зависимости $F = Kd \cdot V^2$, и который связывает внешнюю силу и скорость демпфирования, имеет существенно нелинейный характер и значительно возрастает в области малых скоростей перекаладки рулевого органа.

На основании результатов математического моделирования продемонстрировано влияние параметров дросселирующих отверстий клапана выбора режимов привода на его характеристику демпфирования. Проведено сравнение результатов расчетного и натурным экспериментов.

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДКРЕПЛЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЖАТИИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА СДВИГОВОЙ ЗАДЕРЖКИ

А. М. Зайцев

Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский

Текущий этап развития гражданской авиации в Российской Федерации характеризуется обширным внедрением полимерных композиционных материалов (ПКМ) в агрегаты планера самолета. При этом концепция их проектирования, по типу *black metal*, заключается в повторении отработанных в металлическом исполнении конструктивных схем, но с заменой основного материала на ПКМ. Это обуславливает то, что значительную долю внешней нагрузки воспринимают подкрепленные (стрингерные) панели. Доминирующим силовым фактором, действующим в верхней панели крыла, является, как правило, продольное сжатие. Оно может привести к потере устойчивости панели, последующему истощению ее несущей способности и агрегата в целом.

В работе предложен метод расчета устойчивости подкрепленных панелей из ПКМ при сжатии, основанный на энергетическом подходе Тимошенко — Ритца. В постановке задачи учтено, что при общем изгибе панели деформационная совместность обшивки со стрингерами обеспечивается передачей касательных усилий по линии их сопряжения. В связи с тем, что обшивка имеет конечную жесткость на сдвиг в плоскости, эти усилия вызывают неравномерное распределение мембранных напряжений и снижается эффективность сечения панели при изгибном деформировании. В литературе этот эффект закрепился под названием «сдвиговой задержки» (*shear-lag effect*) [1–2]. Исследование показывает, что недостаточная сдвиговая жесткость композиционной обшивки может являться причиной низкого уровня критических напряжений потери устойчивости. Проведен сравнительный анализ результатов расчета по предлагаемому аналитическому методу с конечно-элементным моделированием, который

подтверждает достоверность подхода и правильность принятых предположений.

Список литературы

1. Тимошенко С.П. Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975.
2. Troitsky M. S. Stiffened plates: bending, stability and vibrations. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. 1976.

ОТЛАДКА ДВУХЦВЕТНОГО ПЛИФ-МЕТОДА НА ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЯХ*

А. А. Зотьева, М. Ю. Ничик, В. М. Дулин

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

Метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) представляет собой бесконтактный способ измерения мгновенных температурных распределений в сечениях потока, чего не могут обеспечить методы тепловизионной съемки или контактные датчики. Метод основан на флуоресценции молекул красителей, возбуждаемых излучением лазерного ножа. Однако ПЛИФ имеет свои ограничения, одним из которых является зависимость от неравномерности пространственного распределения энергии лазерного ножа. Для решения этой проблемы используется двухцветный метод ПЛИФ, где в жидкость добавляют два красителя: один чувствителен

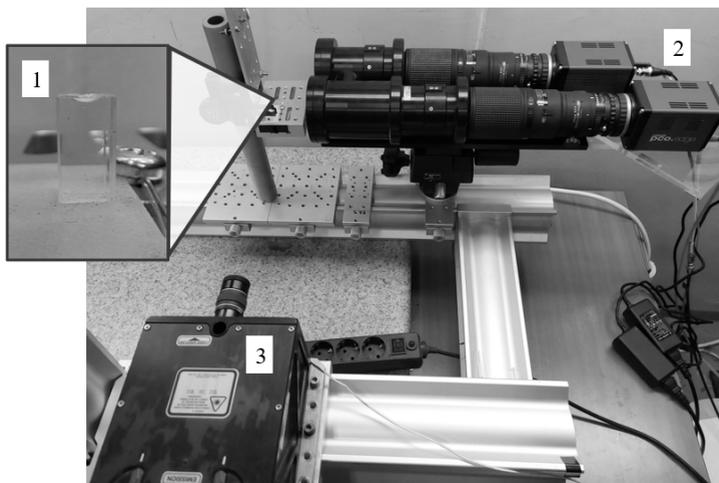


Рис. 1. Измерительная система: 1 — малоразмерная кювета; 2 — камеры; 3 — лазер

* Исследование выполнено за счет мегагранта № 075-15-2024-620, https://megagrant.ru/labs/lab_rus_1082740/

© Зотьева А. А., Ничик М. Ю., Дулин В. М., 2025

к температуре, а другой инертен. Регистрируя их флуоресценцию на разных длинах волн и вычисляя их соотношение, удается компенсировать влияние неоднородности лазерного излучения и повысить точность измерений.

Отладка метода ПЛИФ проведена на маломасштабной кювете с двумя несмешивающимися жидкостями: растительным маслом и глицерином. Было проведено измерение температуры с использованием двух красителей (родамин В, родамин 6G). Система измерения для регистрации флуоресценции красителей состояла из двух камер PCO EDGE 5.5 (16 бит), соединенных делителем пучка и импульсного лазера Nd:YAG-лазер Quantel EverGreen EVG00200 (частота съемки — 10 Гц) с цилиндрической линзой, формирующей лазерный нож (рис. 1). Большой динамический диапазон и малый шум матриц (0,3 %) выбранных камер значительно повышает точность измерений в сравнении с ранними исследованиями [1, 2]. Это преимущество позволяет использовать флуорофоры с близкими спектральными характеристиками, такие как родамины В и 6G, с пиками излучения 550 нм

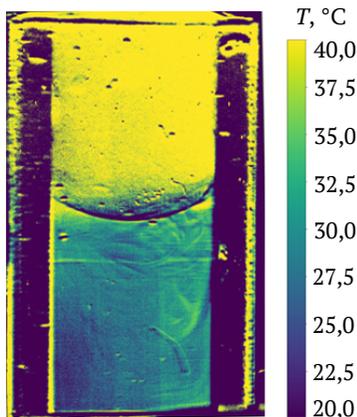


Рис. 2. Поле температуры для кюветы с глицерином и растительным маслом

и 584 нм соответственно. Для раздельной регистрации их интенсивностей каждая камера была оснащена светофильтром: первый фильтр пропускал суммарную флуоресценцию родаминов В и 6G, блокируя лазерное излучение, а второй — только флуоресценцию родамина В.

С использованием данного подхода выполнены температурные калибровки растительного масла и глицерина (10–50 °С), показавшие отклонение менее 5 % от результатов других исследований. Кроме того, была зафиксирована и визуализирована динамика теплового потока в малоразмерной кювете между указанными жидкостями (рис. 2).

Список литературы

1. Rochlitz H., Scholz P. Application of laser-induced fluorescence technique in a duct flow with one heated wall // *Experiments in Fluids*. 2018. Vol. 59, No. 3. P. 54.
2. Kashanj S., Nobes D. S. Application of 4D two-colour LIF to explore the temperature field of laterally confined turbulent Rayleigh–Bénard convection // *Experiments in Fluids*. 2023. Vol. 64, No. 3. P. 46.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ КОНФИГУРАЦИИ С ЛОКАЛЬНЫМИ ВИХРЯМИ В ПЛАЗМЕННОЙ ОБЛАСТИ*

А. А. Иванова, И. В. Мурсенкова

*Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, Москва*

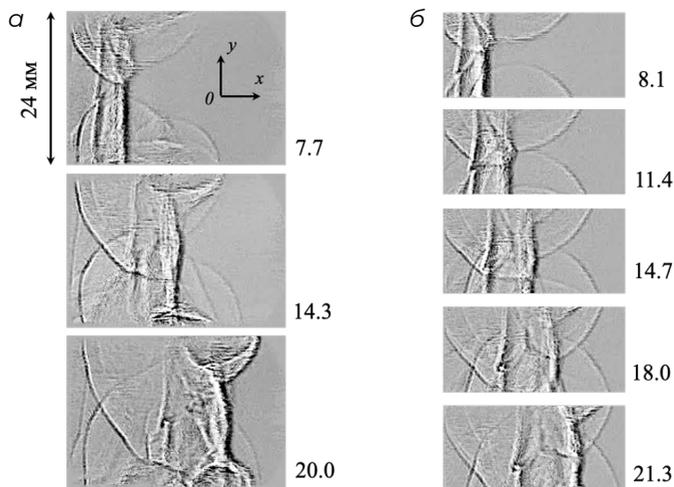
Одним из перспективных методов управления сверхзвуковыми течениями является использование газовых разрядов. Для эффективного разрядного воздействия на сверхзвуковые течения необходимо знать механизм взаимодействия всех газодинамических элементов течения с плазменной областью, в частности в каналах с препятствиями и элементами профилирования [1, 2]. Цель настоящей работы состояла в экспериментальном исследовании структурных особенностей ударно-волновых конфигураций, формирующихся при импульсном плазменном воздействии.

Сверхзвуковое течение создавалось в ударной трубе диафрагменного типа. На нижней стенке камеры находилось препятствие, которое обеспечивало течение с дифрагированной ударной волной ($M = 3,1-3,4$) и неоднородным потоком за ее фронтом. В области перед фронтом дифрагированной ударной волны инициировался импульсный комбинированный объемный разряд. Газодинамическое течение визуализировалось прямым теневым методом и регистрировалось высокоскоростной видеокамерой с частотой до 525 000 кадров в секунду. Рабочим газом являлся воздух при начальном давлении $p_0 = 10-100$ торр.

На рисунке представлены последовательности теневых изображений течения при инициировании комбинированного объемного разряда перед фронтом дифрагированной ударной волны. При плазменном воздействии фронт распался на три разрыва,двигающихся вдоль Ox : две ударные волны и контактную поверхность. От верхней и нижней стенок распространялись ударные волны поверхностных разрядов. Газодинамическое течение характеризовалось образованием новых газодинамических элементов и их сложным взаимодействием друг с другом. В ходе экспериментов было по-

* Работа Ивановой А. А. поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС», грант 24-2-10-54-1.

© Иванова А. А., Мурсенкова И. В., 2025



Две серии теневых изображений ударно-волновой конфигурации в плазменной области, зарегистрированных при частоте съемки 150 000 к/с (а) и 300 000 к/с (б), $M = 3,17 \pm 0,02$, $p_0 = 25\text{--}30$ торр, $x = -20$ мм. Справа от изображений указано время после разряда в микросекундах. Экспозиция 1 мкс

казано, что в области ударно-волновой конфигурации наблюдается формирование локальных структур в виде вихрей. Они сохраняют свою структуру на протяжении дальнейшего движения конфигурации, что указывает на их устойчивость.

Полученные результаты о формировании и эволюции элементов течения в каналах позволяют уточнить методы управления сверхзвуковыми потоками, использующих газовые разряды для модификации течений.

Список литературы

1. Георгиевский П. Ю., Левин В. А., Сутырин О. Г. Иницирование детонации при взаимодействии ударной волны с горючим газовым пузырем различной плотности // Физика горения и взрыва. 2022. № 5. С. 72–78.
2. Иванова А. А., Мурсенкова И. В. Экспериментальное исследование движения ударной волны в плазме импульсного объемного разряда в воздухе. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 22. 2023.

МАГНИТНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МИКРОМЕХАНИКИ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА СЕМЕЙСТВА NI-MN-Z (Z = GA, IN, SN)*

А. П. Каманцев, А. В. Маширов, В. В. Коледов

*Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Москва*

В рамках исследования была изготовлена серия образцов с магнитными фазовыми переходами (ФП) и характерными размерами от микро- до наноразмера. Методом магнетронного напыления получены тонкие пленки на основе сплавов Гейслера Ni-Mn-In и Ni-Mn-Sn-Co, методом селективного ионного травления получены микроламели и микрокантилеверы на основе сплавов Гейслера Ni-Mn-In и Ni-Mn-Ga-Cu. Методом просвечивающей электронной микроскопии в температурном диапазоне 90–350 К наблюдалось влияние размерного эффекта на магнитоструктурный и метамагнитоструктурный ФП. При уменьшении толщины образца до десятков нанометров было показано увеличение характерных температур магнитоструктурного ФП в сплаве Гейслера Ni-Mn-Ga-Cu и уменьшение характерных температур метамагнитоструктурного ФП в Ni-Mn-In.

Используя метод термодинамических потенциалов, было описано смещение характерных температур магнитоструктурного ФП при уменьшении толщины образца до микро- и нанометров. С учетом значения поверхностного натяжения металла рассчитано, что уменьшение толщины образца до 50 нм может увеличивать характерные температуры до значений порядка 18 К [1].

Была разработана конструкторская документация и изготовлена система визуализации для захвата и пространственного переноса микрообъектов биологической природы магнитоуправляемыми микромеханическими элементами на базе сверхпроводящего магнита 10 Тл. На основе ферримагнитного сплава Гейслера семейства Ni-Mn-Ga-Cu были созданы прототипы магнитоуправляемого микропинцета. Был продемонстрирован эффект памяти формы при тепловом воздействии и воздействии сильного магнитного

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, тема FFWZ-2024-0007.

© Каманцев А. П., Маширов А. В., Коледов В. В., 2025

поля до 10 Тл в микроразмерном образце ферромагнитного сплава Гейслера $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{18,5}\text{Ga}_{25}\text{Cu}_{6,5}$ с габаритными размерами не более $30 \times 1,6 \times 2$ мкм в виде микрокантилевера, который явился прототипом магнитоуправляемого микропинцета [2, 3]. Прототип магнитоуправляемого микропинцета способен функционировать при постоянной комнатной температуре за счет изменения магнитного поля, не разрушая биологический объект высокой температурой.

Таким образом открывается широкая область в биотехнологиях: препарирование, деформирование, индивидуальное разделение и др. биологических микро- и нанообъектов.

Список литературы

1. Маширов А. В., Каманцев А. П., Кузнецов Д. Д., Коледов В. В., Шавров В. Г. Поверхностная энергия при мартенситном фазовом переходе в микроразмерном образце сплава Гейслера Ni-Mn-Ga-Cu // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85, № 7. С. 974–977.
2. Mashirov A. V., Irzhak A. V., Tabachkova N. Yu., Milovich F. O., Kamantsev A. P., Zhao D., Liu J., Kolesnikova V. G., Rodionova V. V., Koledov V. V. Magnetostructural phase transition in micro- and nanosize Ni-Mn-Ga-Cu alloys // IEEE Magnetics Letters. 2019. Vol. 10. P. 6107404.
3. Маширов А. В., Иржак А. В., Кошелев А. В., Андреев Н. В., Колесов К. А., Каманцев А. П., Коледов В. В., Шавров В. Г. Эффект памяти формы в микроразмерном образце сплава Гейслера Ni-Mn-Ga-Cu // Физика твердого тела. 2020. Т. 62, № 6. С. 860–863.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ В НЕЛИНЕЙНЫХ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

С. Р. Кармушин

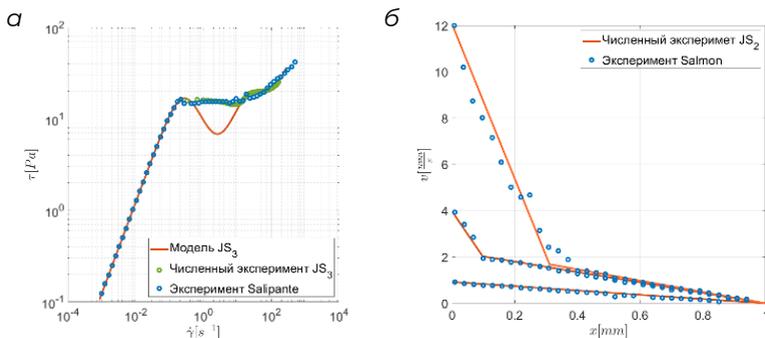
Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Многие жидкости, которые встречаются в природе или используются в технологических процессах, обладают сложной неньютоновской реологией. Одним из важнейших свойств таких сред является вязкоупругость. Как можно понять из названия, жидкости, обладающие этим свойством, могут обладать как характеристиками вязкой жидкости, так и упругого тела в зависимости от условий нагрузки. К примерам можно отнести полимерные жидкости, гели или пасты. Сложная реология таких материалов обеспечивается молекулярной структурой. Достоверное моделирование реологии таких жидкостей, а также их поведения в реальных условиях требует понимания внутренней структуры течения в различных режимах. Одной из характерных особенностей внутренней структуры течения вязкоупругой жидкости является эффект сдвигового расслоения (shear banding). Эффект заключается в возникновении конечного числа однонаправленных слоев, на границе которых скорость сдвига терпит разрыв, и проявляется в широком классе течений и характеризуется резким уменьшением сопротивления потока при транспортировке вязкоупругих жидкостей в каналах и трубах. Одним из способов достоверного описания вязкоупругих жидкостей, имеющих сложную молекулярную структуру, являются нелинейные модели с несколькими временами релаксации (модами).

В данной работе рассмотрены нелинейные модели Джонсона — Сигалмана и Гизекуса как частные случаи общей нелинейной модели несжимаемой вязкоупругой среды с несколькими временами релаксации. Получены условия гиперболичности таких модели в классе одномерных течений. Найдены характеристики и законы сохранения для одномерных моделей в случае произвольного количества времен релаксации, что позволяет ввести в рассмотрение обобщенные разрывные решения. Эффект сдвигового расслоения исследуется в рамках одномерных нестационарных течений между параллельными пластинами (плоское течение Куэтта и плоское течение Пуазейля) и криволинейной геометрии (течение Куэтта — Тейлора). На основе серии расчетов нестационарных течений продемонстрировано

возникновение эффекта сдвигового расслоения при увеличении средней скорости потока.

На примере плоского и криволинейного течений Куэтта проведена валидация модели путем сравнения с экспериментальными результатами, приведенными в работах [1] и [2] (см. рисунок). Проведено сравнение двух рассматриваемых моделей в рамках задачи о разгоне пластины. Исследовано поведение решений двух моделей в постановке периодических деформаций с малой и большой амплитудой (SAOS и LAOS). В случае плоского течения Пуазейля исследована структура стационарных решений со сдвиговым расслоением, получаемых как численный предел нестационарных решений. На основе проведенного анализа выведен алгоритм отбора стационарных решений, асимптотически реализующихся в нестационарных расчетах при различной предыстории изменения градиента давления, что также позволяет корректнее проводить моделирование течения таких жидкостей под действием градиента давления.



Валидация одномерных расчетов в рамках модели Джонсона — Сигалмана с двумя и тремя временами релаксации с экспериментальными исследованиями: *а* — диаграмма зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига (сплошная линия), соответствующие ей результаты численных экспериментов (точки) и экспериментальные результаты [1] (квадраты); *б* — серия профилей скорости в зависимости от скорости в плоском течении Куэтта. Сплошные линии — численные расчеты; круги — эксперимент [2]

Список литературы

1. Salpante P.F., Little C.A. E., Hudson S.D. Jetting of a shear banding fluid in rectangular ducts // *Physical review fluids*. 2017. Vol. 2, No. 3. P. 033302.
2. Salmon J.B. et al. Velocity profiles in shear-banding wormlike micelles // *Physical review letters*. 2003. Vol. 90, No. 22. P. 228303.

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН АЭРАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ*

Ж.-Б. Карра¹, Р. Н. Голых², И. А. Маняхин²,
А. Р. Барсуков², В. Н. Хмелёв²

¹Институт гидродинамики

им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

²Бийский технологический институт (филиал) Алтайского
государственного университета им. Ползунова, Бийск

Во многих промышленных процессах происходит взаимодействие двух фаз — жидкости и газа. Эффективность этих процессов значительно повышается, когда увеличивается межфазная поверхность «газ-жидкость». Один из способов добиться этого — распределить газ в жидкости в виде пузырьков. Это увеличивает площадь для массообмена между двумя компонентами. Воздействие ультразвукового поля создает капиллярные волны на границе раздела. За счет капиллярных волн поверхность раздела пузырьков воздуха дополнительно увеличивается до 1,5 раза и более при воздействии ультразвуковым полем с интенсивностью $4,5 \pm 0,5$ Вт/см² [1, 2]. Цель данной работы — исследовать влияние вязкости и температуры жидкостей на межфазную поверхность. С использованием дистиллированной воды и глицерина было получено семь различных растворов с вязкостью от 1 до 42 мПа·с при температуре 20 °С. На рис. 1 показано, что существует максимальная вязкость, при которой отсутствуют капиллярные волны. При низких значениях вязкости (*a–б*, менее 4 мПа·с) капиллярные волны возникают и их длина невелика. При умеренных значениях вязкости (*в* и *г*, от 4 до 7 мПа·с) длина волны увеличивается, а при значениях вязкости более 12 мПа·с (*д*, *е* и *ж*) капиллярные волны практически отсутствовали. При этом известен факт снижения вязкости жидкости с повышением температуры. Но вместе с этим уменьшается амплитуда ударных волн, образуемых при схлопывании пузырьков [3], поскольку возрастает давление насыщенного пара жидкости,

* Работа выполнена в рамках счет гранта РФФ № 23-12-00278. <https://rscf.ru/project/23-12-00278/>

© Карра Ж.-Б., Голых Р.Н., Маняхин И. А., Барсуков А. Р., Хмелёв В. Н., 2025

препятствующее схлопыванию. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на изучение влияния температуры на формирование поверхностных волн. В ходе исследований температура менялась в диапазоне 20 °С до 60 °С. На рис. 2 для раствора, состоящего из 20 % воды и 80 % глицерина, при температуре 20 °С капиллярные волны отсутствовали (рис. 2, а), и при температуре 60 °С они присутствовали (рис. 2, б). Таким образом, установлена возможность повышения предельной вязкости, при которой достигается эффект увеличения межфазной поверхности, за счет использования более высокой температуры.

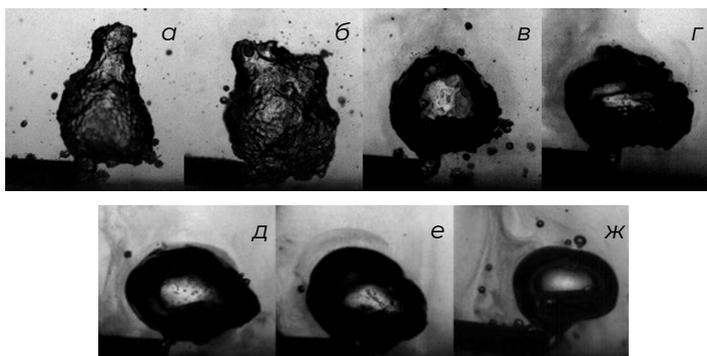


Рис. 1. Аэрационный пузырек в ультразвуковом поле при температуре 20 °С и различной вязкости μ : а — $\mu = 1,0$ мПа/с; б — $\mu = 1,5$ мПа/с; в — $\mu = 4,0$ мПа/с; г — $\mu = 7,4$ мПа/с; д — $\mu = 12,7$ мПа/с; е — $\mu = 25,1$ мПа/с; ж — $\mu = 40,6$ мПа/с при температуре 20 °С

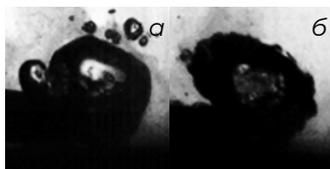


Рис. 2. Пузырь в ультразвуковом поле при вязкости $\mu = 40,6$ мПа/с (при температуре 20 °С) и с различной температурой: а — $T = 20$ °С; б — $T = 60$ °С

Список литературы

1. Гольх Р.Н., Карра Ж.-Б., Хмелёв В. Н., Маняхин И. А., Минаков В. Д., Генне Д. В., Барсуков А.Р. Влияние ультразвукового кавитационного воздействия на межфазную поверхность «газ-жидкость» при принудительной аэрации // ПМТФ. 2024, online first.
2. Golykh R., Shalunov A., Khmelev V., Lopatin R., Minakov V., Shakura V. Evaluation of Optimum Modes and Conditions Providing Increasing Ultrasonic Cavitation Area in High-Viscous and Non-Newtonian Fluids // Rom. J. Acoust. Vib. 2020. No. 2 P. 101–108.
3. Peng K., Qin F., J. Runhua, K. Shimin, Interpreting the influence of liquid temperature on cavitation collapse intensity through bubble dynamic analysis // Ultrason. Sonochem. 2020. Vol. 69 P. 105253.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АНАЛИЗА PIV-ЭКСПЕРИМЕНТОВ

А. Т. Квас, Н. А. Назаров

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

Развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) предоставляет новые варианты решения сложных задач экспериментальной физики. Одной из таких задач является анализ данных, полученных в результате PIV (Particle Image Velocimetry) экспериментов. Метод PIV основан на вычислении перемещения групп специальных трассеров на последовательных изображениях посредством корреляционного анализа для определения скорости течения среды [1]. PIV эксперименты зачастую требуют анализа большого количества изображений для определения статистических характеристик потока, поэтому для ускорения анализа и повышения качества выходной информации в этой области активно применяются нейронные сети.

Одним из ограничений классического корреляционного подхода к обработке PIV экспериментов является малое пространственное разрешение, которое ограничено окном поиска трассеров и составляет порядка 32×32 пикселя. Алгоритмы на основе нейронных сетей, с другой стороны, способны решить данную проблему, получая 1 вектор скорости на 1 пиксель изображения.

На сегодняшний день существует недостаточно работ, где рассматривается применение нейросетевых алгоритмов для анализа именно экспериментальных данных, в основном работы связаны с синтетическими данными. Цели настоящей работы: 1) проверка работоспособности нейросетевых моделей для определения как мгновенных, так и статистических параметров турбулентных течений на экспериментальных данных; 2) предложение вариантов предобработки данных, полученных экспериментальным путем, для улучшения показателей алгоритмов на основе нейронных сетей на этих данных. Основная задача — протестировать существующие модели ИИ на экспериментальных данных.

В ходе работы было проведено воссоздание, обучение и тестирование нейросетевых алгоритмов из литературных источников [2–4]. Основные мо-

дели: FlowNetC, En-FlowNetC, RAFT. В результате проведенных экспериментальных исследований были получены первичные результаты моделей, проведено сравнение метрик между тестированием на синтетических и экспериментальных данных.

Список литературы

1. Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–131.
2. 1. Fischer P. et al. FlowNet: Learning optical flow with convolutional networks // arXiv preprint arXiv:1504.06852. 2015.
3. Ji K., An Q., Hui X. Cross-correlation-based convolutional neural network with velocity regularization for high-resolution velocimetry of particle images // Physics of Fluids. 2024. Vol. 36. No. 7.
4. Teed Z., Deng J. Raft: Recurrent all-pairs field transforms for optical flow // Computer Vision–ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part II 16. Springer International Publishing, 2020. P. 402–419.

ВЛИЯНИЕ ВЫДУВА ГАЗОВОЙ СТРУИ НА СВЕРХЗВУКОВОЕ ПОПЕРЕЧНОЕ ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА *

В. А. Кисловский

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

Исследование поперечного обтекания тела цилиндрической формы является хорошо изученной задачей газовой динамики [1–3]. В современной постановке данная классическая задача усложняется дополнительными факторами.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию течения при физическом моделировании поперечного обтекания сверхзвуковым потоком цилиндра при выдуве газовой струи с поверхности обтекаемого тела с учетом рассмотрения различных вариантов расположения отверстия выдува по окружности в среднем сечении рассматриваемого цилиндра конечного размера.

Изучается обтекание модельного тела цилиндрической формы с диаметром $d = 25$ мм и длиной $l = 80$ мм. Относительное удлинение рассматриваемого тела $\lambda = 3,2$. Сжимаемый набегающий на модель поток имеет полное давление и полную температуру $P_0 = 4,6$ бар и $T_0 = 298$ К соответственно. Скоростные характеристики потока обеспечиваются применением соответствующего профилированного сопла.

Рассматривается обтекание цилиндра без выдува газовой струи и при нескольких вариантах расположения отверстия выдува по окружности в среднем сечении цилиндра. В вариантах выдува (1)–(5) положение отверстия выдува струи имеет угловую координату $\chi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ соответственно.

В каждом случае отверстие выдува имеет диаметр $d_j = 2$ мм и расположено в среднем сечении модели. Параметры струи, а именно полное давление $P_{0j} = 12$ бар и полная температура $T_{0j} = 298$ К, сохраняются неизменными в каждом рассмотренном случае. Показатель соотношения импульсов струи и набегающего потока с $J_0 = 0,13$ [4]. Различные случаи выдува струи с поверхности обтекаемого модели были реализованы путем поворота модели

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-79-01057).
© Кисловский В. А., 2025

вокруг оси цилиндра. Для моделирования обтекания цилиндра без выдува газовой струи с его поверхности использовалась экспериментальная модель без отверстия.

Таким образом, были получены экспериментальные данные о влиянии рассмотренных случаев выдува на сверхзвуковое поперечное обтекание цилиндрического тела.

Список литературы

1. Корнилов В. И., Лысенко В. И. // Вестник Новосибирского государственного университета. 2011 Серия: Физика. № 6 (4). С. 16–24.
2. Башкин В. А., Егоров И. В., Езов И. В., Утюжников С. В. // Учен. зап. ЦАГИ. 2012. № 43 (5). С. 27–45.
3. Sinclair J., Cui X. (2017) // *Physics of Fluids* 29. 026102.
4. Усманов А. И. (1998) // *Изв. РАН. МЖГ*. 1. 179–183.

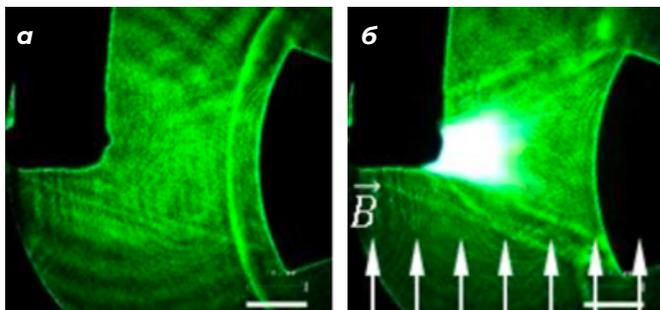
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОГО МГД-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕСОВ*

А. Е. Козик¹, А. Р. Горбушин¹, А. С. Шмаков², М. А. Ядренкин²

¹Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский

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

Проведена серия экспериментов на магнитогидродинамическом (МГД) стенде ИТПМ СО РАН [1] на базе ударной трубы УТ-4М для исследования нестационарного обтекания модели со сферическим затуплением при высокой сверхзвуковой скорости потока воздуха, нулевом угле атаки и при различных комбинациях величин напряжения ионизирующего разряда перед моделью и индукции внешнего магнитного поля. Измерения действующих на модель нагрузок проводились с использованием классических шести-компонентных тензометрических весов ЦАГИ 6Ф-517. В ходе работы измерялись электрические сигналы тензочувствительных весов и зарядового акселерометра 1С302НА (ООО «ГТЛАБ», г. Саров), установленного в испытуемой модели, а также велась высокоскоростная шпирен-видеосъемка для определения условий обтекания модели.



Картина обтекания: а — без МГД-взаимодействия; б — при МГД-взаимодействии

* Работа выполнена за счет гранта РФФИ (№ 23-19-00041).

© Козик А. Е., Горбушин А. Р., Шмаков А. С., Ядренкин М. А., 2025

Ожидаемо, в экспериментах с разрядом без внешнего магнитного поля, а также с полем без разряда заметного влияния на течение не наблюдается. В первом случае электрическая дуга моментально сносится вниз по течению вместе с рабочим газом, а во втором поле не воздействует на неионизированный газ. Наибольший интерес представляет случай с разрядом и полем при $B = 0,81$ Тл, когда дуга стабилизируется между электродами. При этом происходит значительная перестройка течения с формированием конической зоны взаимодействия, которая приводит к снижению силы лобового сопротивления системы. Параметр Стюарта, характеризующий отношение работы электромагнитной силы к работе набегающего потока, в экспериментах с МГД-взаимодействием составлял $S \approx 0,3$.

Показания весов обрабатывались по методу, близкому к описанному в [2], для нахождения нестационарной силы, действовавшей на модель. Метод позволяет устранять влияние инерциальных сил из показаний тензосеток и вычлнять только аэродинамические. Для компоненты продольной силы использовалось выражение в следующем виде:

$$AF^a = M \cdot \ddot{x}_2 + \beta \cdot \dot{AF} / k + AF, \quad (1)$$

где AF^a — искомая нестационарная сила, AF — показания компоненты, M — суммарная масса модели и метрической компоненты, \ddot{x}_2 — продольное ускорение модели, β — коэффициент демпфирования, k — коэффициент жесткости. Масса M была найдена в статических условиях при нескольких угловых положениях весов [3]. Неизвестные динамические параметры k и β определялись экспериментально по результатам свободных затухающих колебаний весов [2].

На основе обработанных показаний тензосеток рассчитаны коэффициенты сопротивления модели и проведен сравнительный анализ результатов пусков. Так, для случая без МГД-взаимодействия коэффициент сопротивления составил $C_{xa} \approx 1,17$, а в пуске со взаимодействием — $C_{xa} \approx 0,90$.

Список литературы

1. Маслобоев И. А., Фомичев В. П., Шевченко А. Б., Ядренкин М. А. Экспериментальный комплекс для исследований высокоскоростных магнитогидродинамических течений // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 3. С. 48–55.
2. A. R. Gorbushin, A. E. Kozik, E. N. Anokhina. Non-stationary load measurement using six-component strain-gauge balances. Measurement. 2024. 114176. ISSN 0263-2241, doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114176.
3. Горбушин А. Р. Метод учета влияния веса модели и веса динамометра на показания тензометрических весов // Учен. зап. ЦАГИ. 2009. Т. XL. № 4. С. 63–70.

ВЛИЯНИЕ УСИЛИЯ ПРИЖАТИЯ В МЕХАНИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ $GdNi_2$ — МЕДЬ НА ПРОЦЕСС ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ*

К. А. Колесов, А. С. Кузнецов, В. В. Коледов, А. В. Маширов

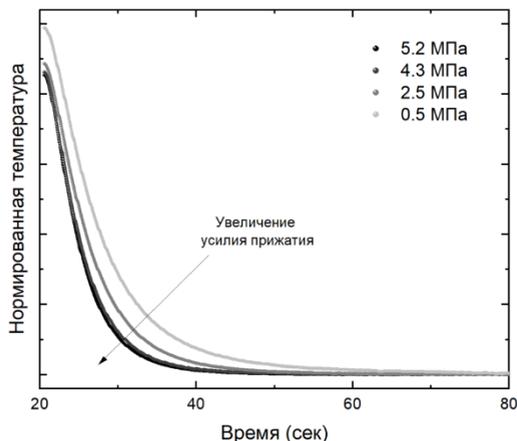
*Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Москва*

На сегодняшний день магнитное охлаждение является перспективной технологией охлаждения, в основе которой лежит магнитокалорический эффект (МКЭ) [1]. МКЭ представляет собой обратимое изменение энтропии магнитного материала в изотермических условиях и температуры в адиабатических условиях за счет воздействия на материал внешнего магнитного поля. Максимальное изменение температуры материала достигается в области фазового перехода. Общее число публикаций в области магнитокалорики стремительно растет за последние десятилетия [2]. Однако при создании системы магнитного охлаждения, необходимо управлять переносом тепла между рабочим телом, обладающим МКЭ и объектом охлаждения. Для этого применяются устройства терморегулирования. Основные типы данных устройств подразделяются на тепловые ключи, терморегуляторы, термодиоды и термотранзисторы [3]. Данные устройства по принципу действия подразделяются на: жидкостные (газовые), механические и твердотельные. В работе рассматривается механический тепловой ключ с возвратно-поступательным принципом действия, за счет перемещения подвижного штока линейного электродвигателя. В качестве рабочего тела применялся сплав $GdNi_2$, который обладает максимальным значением изменения температуры в области 77 К [4]. В качестве теплоприемника выступает медный цилиндр. В работе рассматривается процесс теплопередачи между рабочим телом и медным теплоприемником при различных усилиях прижатия 160 кПа до 5,2 МПа между контактной парой $GdNi_2$ -медь. Эксперимент проводился на базе криомагнитной системы в диапазоне температур 80–120 К и внешних магнитных полях до 3, 5, 10 Тл. Усилие прижатия контролировалось по току линейного электродвигателя. Рабочее тело $GdNi_2$ закрепляли к подвижному штоку линейного электродвигателя, а медный теплоприемник кре-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10197), <https://rscf.ru/project/20-79-10197>.

© Колесов К. А., Кузнецов А. С., Коледов В. В., Маширов А. В., 2025

пился к неподвижной трубе из нержавеющей стали, расположенной внутри криостата. По итогам эксперимента в зависимости от различных усилий прижатия построен график изменения температуры рабочего тела при начальной температуре около 77 К (см. рисунок).



Зависимость изменения температуры $GdNi_2$ от различных усилий прижатия

Нормированная температура рабочего тела соответствует закону:

$$T_{\text{норм}}(\tau) = T_0 + Ae^{R\tau}.$$

Список литературы

1. Kuz'min M.D., Tishin A.M. Magnetocaloric effect. Part 1: An introduction to various aspects of theory and practice // *Cryogenics*. 1992. Vol. 32, No. 6. P. 545–558.
2. Mejía C. S., Niehoff T., Straßheim M., Bykov E., Skourski Y., Wosnitza J., Gottschall T. On the high-field characterization of magnetocaloric materials using pulsed magnetic fields // *Journal of Physics: Energy*. 2023. Vol. 5, No. 3. P. 034006.
3. Swoboda T., Klinar K., Yalamarthy A. S., Kitanovsk, A., Munoz R. M. Fluidic and mechanical thermal control devices // *Advanced electronic materials*. 2021. Vol. 7, No. 3. P. 2000623.
4. Taskaev S., Khovaylo V., Skokov K., Liu W., Bykov E., Ulyanov M., Bataev D., Basharova A., Kononova M., Plakhotskiy D., Bogush M., Gottschall T., Gutfleisch O. Magnetocaloric effect in $GdNi_2$ for cryogenic gas liquefaction studied in magnetic fields up to 50 T // *Journal of applied physics*. 2020. Vol. 127, No. 23. P. 233906.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИХРЕЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ*

А. Я. Котвицкий, И. А. Моралев, М. В. Устинов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Наиболее распространенным сценарием образования ламинарно-турбулентного перехода на поверхности стреловидных крыльев в условиях повышенного уровня турбулентности набегающего потока, а также при доминировании трехмерных волн Толмина — Шлихтинга является комбинированный переход [1–2]. В связи высокого инкремента нарастания нестационарных мод пограничного слоя [1], они оказываются определяющими возмущениями в задаче затягивания перехода.

В работе проведено моделирование управления амплитудой нестационарных мод неустойчивости поперечного течения (НПТ) в рамках линейного подхода по схеме упреждающего управления, когда сенсор диагностирует возмущения выше по потоку на $x/c = 0,1$, актуатор воздействует ниже на $x/c = 0,4$, а оценивание качества управления выполняется на $x/c = 0,6$ (см. рисунок, а). Используя численные результаты распространения возмущений в дозвуковом пограничном слое на 40 град. стреловидной пластине, рассчитанных с помощью параболизированных уравнений устойчивости (PSE) для условий аэродинамической трубы Д-3 (ОИВТ РАН), проведена идентификация системы. Передаточные функций $H_{12}(\omega, \beta)$ между входом x_1 и выходом x_2 системы для каждой временной и пространственной гармоники рассчитывались по ее N-фактору из результатов PSE. На основании рассчитанных откликов пограничного слоя на модельное локализованное воздействие [3] разработана численная модель 21-канального актуатора. Расчет управляющего воздействия сводится к задаче линейной регрессии, аналогично управлению амплитудой стационарных вихрей НПТ [4]. Для аппаратной реализации алгоритма управления разработана эффективная схема выполнения матричных вычислений при рассмотрении многомерной системы с несколькими входами и выходами. Проведена процедура понижения

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00627.

© Котвицкий А. Я., Моралев И. А., Устинов М. В., 2025

размерности системы посредством выделения наиболее усиливающихся и наблюдаемых Фурье гармоник. В постановке моделирования предполагается конечность ширины размаха многоканального актуатора и времени наблюдения. Продемонстрировано снижение амплитуды пакета на 90 % (8 дБ) в области воздействия актуатора (см. рисунок, б). Разработаны рекомендации к сенсору и контроллеру в схеме управления. Пространственное и временное разрешение должно описывать 4–5 точками длину волны и период целевых возмущений, а время записи реализации должно соответствовать 3–4 периодам для корректного предсказания фазы сигнала.

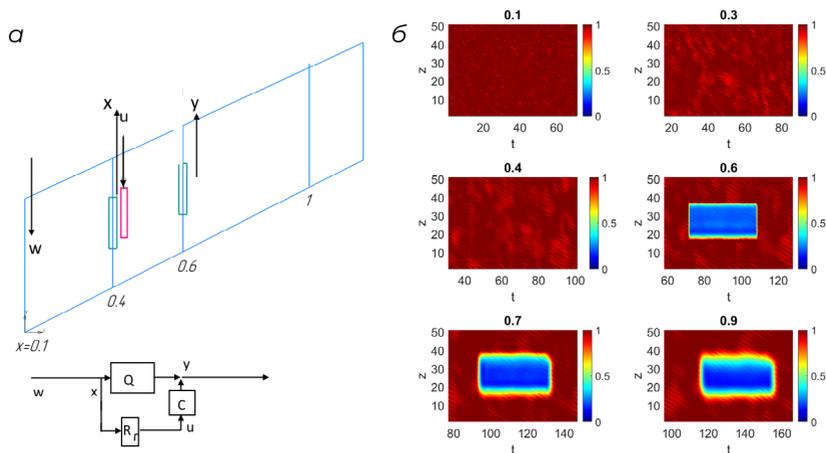


Схема цепи управления (а); $z-t$ -осциллограмма при управлении на различных расстояниях от передней кромки (б)

Список литературы

1. Bippes H., Basic experiments on transition in three-dimensional boundary layers dominated by crossflow instability // Progress in Aerospace Sciences. 1999. Vol. 35, No. 4. P. 363–412.
2. Borodulin V.I., et al., Experimental and theoretical study of swept-wing boundary-layer instabilities. Three-dimensional Tollmien-Schlichting instability // Phys. Fluids. 2019. Vol. 31, No. 11. P. 1–25.
3. Moralev I., Bityurin V., Firsov A., Sherbakova V., Selivonin I., Ustinov M. Localized micro-discharges group dielectric barrier discharge vortex generators: Disturbances source for active transition control // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2020. Vol. 234, No. 1. P. 42–57.
4. Abdullaev A., Kotvitskii A., Moralev I., Ustinov M. On the Possibility of Cross-Flow Vortex Cancellation by Plasma Actuators // Aerospace, 2023. Vol. 10, No. 5.

ФОКУСИРОВКА ВНУТРЕННИХ ВОЛН ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ СЕГМЕНТА ТОРОИДА: СРЕДНЕЕ ТЕЧЕНИЕ

С. А. Кудряшова, Н. Д. Шмакова

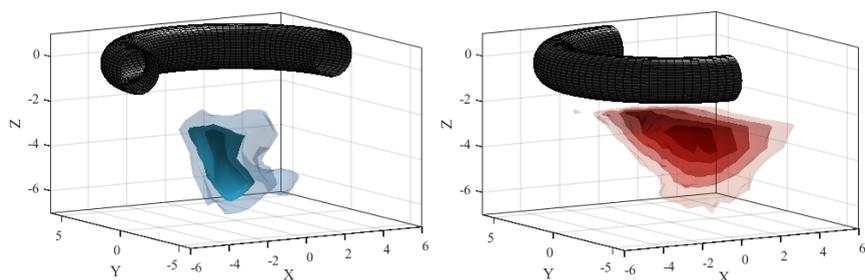
*Институт гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

Фокусировка внутренних волн в океане возникает в результате взаимодействия приливных течений с искривленными подводными горными хребтами. Такое явление наблюдается в норвежских фьордах [1] и в кратерах, оставленных метеоритами на дне океана [2]. Волновая фокусировка приводит к существенному увеличению амплитуды внутренних волн, из-за чего происходит их обрушение [3–4], а следовательно, и перемешивание стратификации в океане.

При проведении экспериментов удобно переходить в систему отсчета, связанную с приливными течениями, где жидкость покоится, а объект, моделирующий подводную гору (хребет), совершает колебания. В качестве объектов (волнопродукторов), моделирующих искривленный горный хребет, были выбраны тороид, его половина и четверть. Эксперименты проводились в резервуаре из оргстекла, заполненном линейно стратифицированной жидкостью. Синусоидальные горизонтальные колебания погруженного в жидкость волнопродуктора контролировались шаговым двигателем. Регистрации данных происходила с помощью метода трассерной визуализации частиц (PIV): мелкодисперсные частицы, рассеянные в жидкости, отражали в камеру излучение от лазерного ножа. Лазерный нож подсвечивал либо вертикальную плоскость, параллельную направлению колебаний, либо горизонтальную плоскость на различных расстояниях от волнопродуктора. Для сегментов тороида рассматривались «симметричные» и «асимметричные» колебания в зависимости от расположения сегмента по отношению к вертикальной плоскости сечения лазерного ножа.

В результате данного исследования был проведен анализ амплитуд внутренних волн, возникающих при колебаниях различных волнопродукторов, и их сравнение с оценками трехмерной линейной теории [5]. Было установлено, что ключевым условием возникновения фокусировки внутренних волн является наличие горизонтальной кривизны волнопродуктора.

Структура течения подробно рассматривается в случае горизонтальной плоскости сечения лазерного ножа. Интерес представляет возникающее в случае асимметричных колебаний половины и четверти тороида горизонтальное среднее течение. Предполагается возникновение в зоне фокусировке горизонтального потока от волнопродуктора к периферии (см. рисунок). В результате проведения длинной серии экспериментов была получена временная зависимость скорости данного среднего потока, а также рассчитаны горизонтальные и вертикальные дрейфы Стокса.



Изоповерхности горизонтального среднего течения, полученные путем осреднения данных горизонтальной скорости по 4 периодам колебания половины тороида в установившемся режиме в горизонтальных плоскостях на различных расстояниях от волнопродуктора: симметричная (слева) и асимметричная (справа) конфигурация

Список литературы

1. Vlasenko V., Stashchuk N., Inall M., Porter M., Alevbik D., Focusing of baroclinic tidal energy in canyon // Journal of Geophysical Research 2016. Vol. 121. P. 2824–2840.
2. Peliz A., Le Cann B., Mohn C., Circulation and mixing in a deep submerged crater: tore seamount // Geophys. Res. Abstr. 11, 2016.
3. Buhler O., Muller C., Instability and focusing of internal waves in the deep ocean // J. Fluid Mech. 2007. Vol. 588. P. 1–28.
4. Ermanyuk E., Shmakova N., Flor J., Internal wave focusing by a horizontally oscillating torus // J. Fluid Mech. 2017. Vol. 813. P. 695–715.
5. Voisin B., Ermanyuk E., Shmakova N., Flor J., Internal wave focusing by annular forcing: theory // 68th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics 2015. Vol. 60. M31.00003.

ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ ЯЭУ НА ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Д. А. Куликов, Е. Е. Талисов, С. И. Игрушкин

*АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения
им. И. И. Африкантова», Нижний Новгород*

АО «ОБКМ Африкантов» является разработчиком ядерных энергетических установок транспортного и стационарного исполнения. Одно из направлений деятельности это создание ЯЭУ для атомных ледоколов.

В настоящее время в России создаются универсальные атомные ледоколы с новейшей установкой РИТМ-200. Данная установка представляет собой реактор интегрального типа, с внутренним расположением парогенераторов и электронасосами на фланцах. Большое количество новых решений, примененных при разработке данной реакторной установки, привели к необходимости проведения расширенного цикла испытаний, в том числе по определению вибрационного состояния элементов и оборудования ЯЭУ при работе ледокола в реальных условиях эксплуатации. Испытания проводились с целью подтверждения заявленных требований проекта.

В рамках данных испытаний был выполнен большой объем исследований вибрационного состояния отдельных элементов и оборудования ЯЭУ в различных режимах работы установки, а также при отличающихся внешних условиях.

Испытания проводились в процессе проводки универсальным атомным ледоколом «Сибирь» судов по Северному Морскому пути в июне-июле 2024 года.

Измерения вибрации выполнялись на крышке реактора, на стойках приводов системы управления и защиты, на крышках электронасосов, а также на корпусных конструкциях судна. Необходимо отметить, что на ледоколе установлено две реакторных установки, в связи, с чем испытания выполнялись последовательно, на двух бортах.

Определение вибрации элементов ЯЭУ в реальных условиях эксплуатации представляет собой нетривиальную задачу. Необходимо отметить, что на действующем ледоколе не была предусмотрена проектом возможность

непрерывного мониторинга вибрации. С целью реализации процесса вибромониторинга была изготовлена специализированная оснастка для крепления датчиков вибрации. В процессе испытаний использовалась многоканальная система измерения вибрации в совокупности с модулем беспроводной передачи данных по технологии Wi-Fi.

При измерении и анализе вибрации элементов конструкции на действующем ледоколе присутствуют постоянно изменяющиеся внешние условия, такие как нестационарный режим работы вспомогательного оборудования и ударные нагрузки, вследствие прохода судна через ледовые поля. Для получения спектральных характеристик использовались различные настройки преобразования Фурье, в частности усреднения по времени. Для получения более качественной картины уровней вибрации элементов ЯЭУ было принято решение использования усреднения по пиковым уровням вибрации. Так в сравнении с линейными усреднениями по времени была получена разница по амплитудам вибрации, достигающая 5 раз.

Анализ виброскорости выполнялся в широком диапазоне частот от 1 до 5000 Гц. При этом необходимо отметить, что основное вибрационное воздействие на оборудование и элементы ЯЭУ находится в низкочастотном диапазоне до 100 Гц, а максимальные уровни достигаются на частотах вращения гребных винтов и собственных частотах оборудования.

По итогам работы был получен широкий опыт выполнения мониторинга вибрации на действующем судне, а также определены уровни виброскорости, регистрируемые на элементах конструкции и основные возбуждающие частоты. По результатам анализа было установлено, что полученные уровни вибрации не оказывают существенного влияния на штатную эксплуатацию оборудования ЯЭУ.

ИССЛЕДОВАНИЯ АДАПТИВНОЙ МЕХАНИЗАЦИИ ЗАДНЕЙ КРОМКИ КРЫЛА МАГИСТРАЛЬНОГО САМОЛЕТА

В. Б. Курилов

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский*

Взлетно-посадочная механизация крыла является одной из основ летательного аппарата. Современные самолеты располагают весьма эффективными устройствами повышения подъемной силы, что является одним из конкурентных преимуществ в борьбе за долю рынка. Высокий уровень несущих свойств на режимах взлета и посадки напрямую влияет на экономическую привлекательность самолета, поскольку позволяет увеличить взлетный вес, а также полезную нагрузку или запас топлива.

Последние полвека сложность взлетно-посадочной механизации задней кромки крыла магистральных самолетов непрерывно уменьшается. Это связано с совершенствованием методов вычислительной гидродинамики и ростом мощности современных компьютеров. Громоздкая многощелевая механизация задней кромки крыла утяжеляет самолет, делает его дороже и сложнее в обслуживании, а также является менее жесткой. В настоящее время преобладающей тенденцией является стремление производителей авиационной техники упростить механизм перемещения однощелевого закрывка и перейти от выдвигания с отклонением к простому повороту.

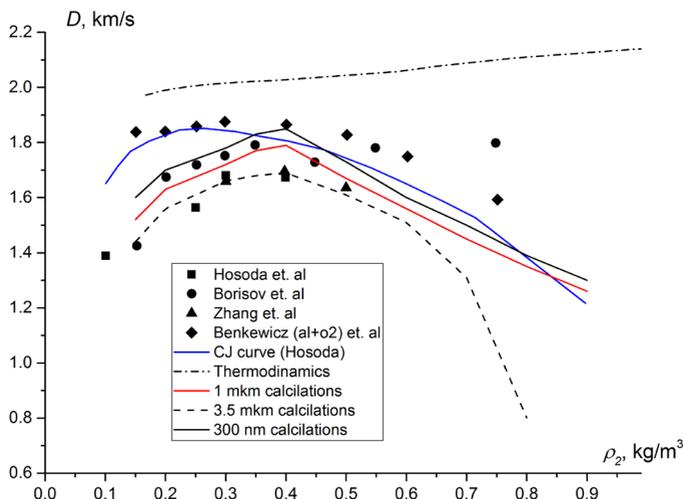
В настоящей работе представлены расчетно-экспериментальные исследования по определению особенностей поведения аэродинамических характеристик механизированного профиля крыла магистрального самолета с адаптивной механизацией задней кромки. Показано, что применение поворотного закрывка с отклоняемым вниз интерцептором позволяет добиться сохранения несущих свойств профиля при одновременном упрощении кинематики выдвигания.

ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ*

С. А. Лаврук

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

Для описания процессов горения частиц алюминия в различных средах используются модели различной сложности, позволяющие описать процесс с той или иной стороны. Так при определении равновесного состава смеси при горении могут решаться системы уравнений, учитывающие десятки, сотни и даже тысячи химических реакций [1]. Для ускорения расчетов могут использоваться редуцированные модели, в которых количество реакций сокращено [2]. Они позволяют сохранить основные реакции, при этом убирая те, что не влияют на описываемый процесс. В некоторых случаях



Скорость распространения детонации в смеси алюминий + воздух

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00046.

возможно заменить сложные цепочки химических реакций на одну-две. Это позволяет проводить относительно быстрые расчеты, и получать результаты совпадающие с данными экспериментов [3, 4].

В данной работе проводится верификация и валидация модели гетерогенной детонации частиц алюминия. Так в работе [4] приведена модель горения алюминия для реализации гибридной детонации. Осуществляется проверка данной модели по скоростям детонации и по размеру детонационной ячейки. На рисунке приведено сравнение расчетов детонационного горения частиц алюминия в воздухе для частиц (0,3 мкм — черная кривая, 1 мкм — красная кривая и 3,5 мкм — пунктирная кривая) по модели [4] с данными экспериментов различных авторов. Видно, что полученные результаты согласуются, как с расчетами других авторов (синяя кривая), так и с результатами экспериментов (точки). Полученные скорости детонации с помощью термодинамических расчетов (пунктирная кривая) дают завышенные результаты по сравнению с данными экспериментов.

В дальнейшем будут проведены сравнения по размеру детонационной ячейки.

Список литературы

1. Трусов Б. Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий. // Труды XIV Межд. конф. по хим. термодинамике. 2002.
2. Starik A. M., Kuleshov P. S., Sharipov A. S., Titova N. S., Tsai C. J. Numerical analysis of nanoaluminum combustion in steam // *Combustion and Flame*. 2014. № 6 (161). P. 1659–1667. DOI: 10.1016/j.combustflame.2013.12.007.
3. Benkiewicz K., Hayashi A. K. Parametric studies of aluminum combustion model for simulations of detonation waves // *AIAA Journal*. 2006. No. 3 (44). P. 608–619. DOI: 10.2514/1.20412.
4. Афанасенков А. А., Хмель Т. А. Валидация модели гибридной детонации водород-воздушных смесей с частицами алюминия // *Челябинский физико-математический журнал*. 2024. № 4 (9). С. 177–186. DOI: 10.47475/2500-0101-2024-9-2-177-186.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАВНОВЕСИЯ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА, АРМИРОВАННОГО КРИВОЛИНЕЙНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Э. И. Леонова

Институт гидродинамики

им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Новосибирский государственный университет, Новосибирск

В работе рассматривается двумерная математическая модель равновесия упругого тела, представляющего собой неоднородный (композитный) материал, содержащий множество тонких периодически расположенных криволинейных включений. Расстояние между соседними включениями в модели характеризуется малым параметром ε . Сама модель является естественным обобщением постановки из статьи [1], в которой рассматривалось упругое тело с одним включением. Искомым в задаче является распределение поля перемещений u^ε . В настоящей работе выполнена и строго обоснована процедура гомогенизации, т. е. совершен предельный переход в уравнениях изучаемой модели при $\varepsilon \rightarrow 0$. В результате построена усредненная модель, решением которой служит предел семейства $\{u^\varepsilon\}$ и в рамках которой более не выделяется каждое отдельное тонкое включение, а дается эффективное описание равновесия на макроскопическом масштабе — характерном масштабе всего тела.

Затем с помощью метода конечных элементов в программном комплексе FreeFem++ [2] проведены численные расчеты как для исходной задачи с конечным числом включений, так и для усредненной задачи. Найдено распределение горизонтальных и вертикальных перемещений. Численно показана сходимости $\{u^\varepsilon\}$ к решению усредненной задачи при стремлении числа включений к бесконечности, т. е. при $\varepsilon \rightarrow 0$, что хорошо согласуется с выводами, следующими из теории усреднения.

Список литературы

1. Rudoy E, Sazhenkov S. Variational Approach to Modeling of Curvilinear Thin Inclusions with Rough Boundaries in Elastic Bodies: Case of a Rod-Type Inclusion. *Mathematics*. 2023; 11(16):3447.

2. Жуков М. Ю., Ширяева Е. В. Использование пакета конечных элементов FreeFem++ для задач гидродинамики, электрофореза и биологии. Ростов н/Д : Изд-во ЮФУ, 2008. 256 с.

ЭНЕРГИЯ И МЕДИАННАЯ ЧАСТОТА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ КАК ИНДИКАТОРЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАТЕРИАЛАХ*

М.Л. Линдеров, Д.Л. Мерсон

*НИИ прогрессивных технологий,
Тольяттинский государственный университет, Тольятти*

Явление акустической эмиссии (АЭ) лежит в основе одноименного метода неразрушающего контроля, который успешно используется как в промышленности [1], так и в лабораторных условиях [2]. К его неоспоримым достоинствам можно отнести широкий спектр проблем, которые он может решать (локация дефектов, поиск утечек, обнаружение распространения в материале хрупкой трещины и др.). С другой стороны, работоспособность данного метода во многом зависит от технического сопровождения: от типа датчиков (резонансных или широкополосных) и набора регистрируемых параметров АЭ (амплитуда сигнала, суммарная АЭ, скорость счета и др.), характеризующих записанный стрим. Среди параметров оценки совокупно-

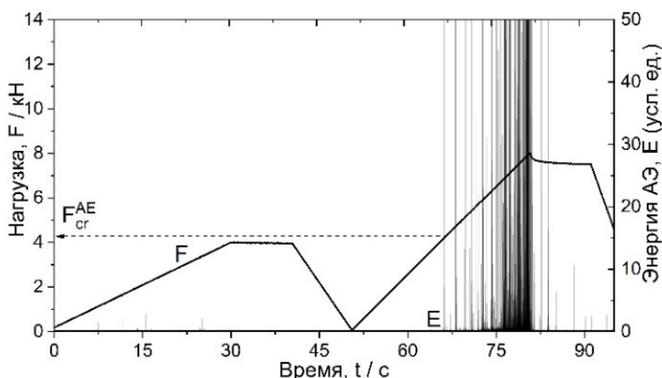


Рис. 1. Диаграмма нагружения, синхронизированная с энергией E , и схема определения критической нагрузки по данным E

* Работа выполнена в рамках государственного задания FEMR-2024-0002.

© Линдеров М.Л., Мерсон Д.Л., 2025

го сигнала АЭ, широко применяемых для разделения отдельных процессов и их кинетики, происходящих при нагружении материала, являются энергия (E) и медианная частота (f_m). В представленной работе будут продемонстрированы примеры по использованию данных параметров для контроля следующих процессов.

1. Определение момента страгивания хрупкой трещины (рис. 1) при ступенчатом нагружении на трехточечный изгиб образца высокопрочной стали [3].

2. Определение момента интенсификации процесса динамической рекристаллизации (рис. 2) при одноосном растяжении образца медицинского магниевого сплава [4].

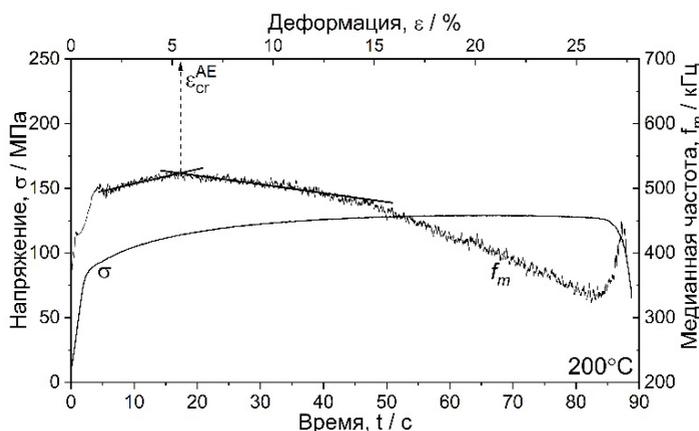


Рис. 2. Диаграмма растяжения, синхронизированная с медианной частотой f_m и схема определения критической деформации по данным f_m

Энергия (E) и медианная частота (f_m) являются простыми для вычисления (с точки зрения затраты ресурсов компьютерной системы) и одновременно перспективными параметрами для идентификации начала и завершения процессов, протекающих в металлах при нагружении.

Список литературы

1. Растегаев И. А., Растегаева И. И., Мерсон Д. Л., Иванов В. И. Современные возможности метода акустической эмиссии при оценке технического состояния промышленного оборудования: обзор и схемы применения // Контроль. Диагностика. 2024. № 9 (315). С. 4–23.

2. Vinogradov A. Signatures of plastic instabilities and strain localization in acoustic emission time-series // *Metals*. 2025. 15. 46.

3. Линдеров М.Л., Мерсон Д.Л., Виноградов А.Ю. Кластерный анализ как одно из направлений развития метода АЭ для исследования деградации материалов // XXII Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 12–14 апреля 2016 г. С. 29–32.

4. Merson D., Linderov M., Brilevsky A., Danyuk A., Vinogradov A. Monitoring Dynamic Recrystallisation in Bioresorbable Alloy Mg-1Zn-0.2Ca by Means of an In Situ Acoustic Emission Technique // *Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 328.

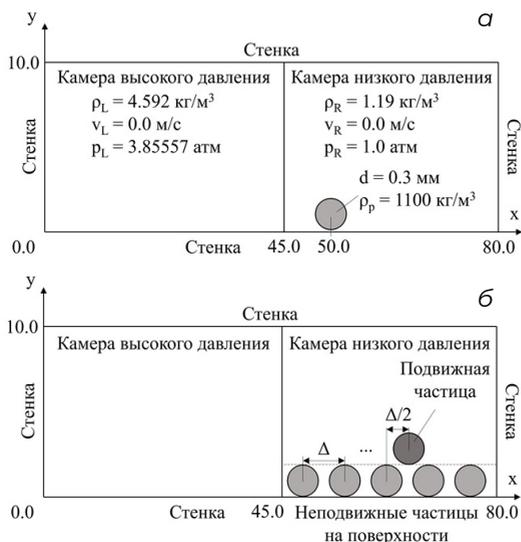
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВА ЧАСТИЦЫ ОТ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ С РАЗРЕШЕНИЕМ ЧАСТИЦ

А. И. Лопато¹, П. С. Уткин²

¹Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

²Harbin Institute of Technology, Harbin, China

Математическое моделирование с разрешением частиц является мощным инструментом для исследования нестационарных аэродинамических эффектов в высокоскоростных двухфазных потоках газа и частиц. В данной работе рассматривается отрыв одиночной частицы от поверхности. Эту



проблему часто рассматривают как синтетический тестовый случай для проверки методов погруженной границы. Цель работы — рассмотреть сценарий, который очень похож на реальный эксперимент. Постановка задачи соответствует экспериментам, проведенным в [1]. Детали постановки задачи показаны на рис. 1. Частица, расположенная либо на гладкой, либо шероховатой поверхности взаимодействует с плоской ударной волной с числом Маха 1,33. Шероховатая поверхность моделируется как ряд неподвижных частиц

Рис. 1. Постановка и параметры задачи. Геометрические размеры указаны в миллиметрах: *а* — частица на гладкой поверхности; *б* — частица на шероховатой поверхности

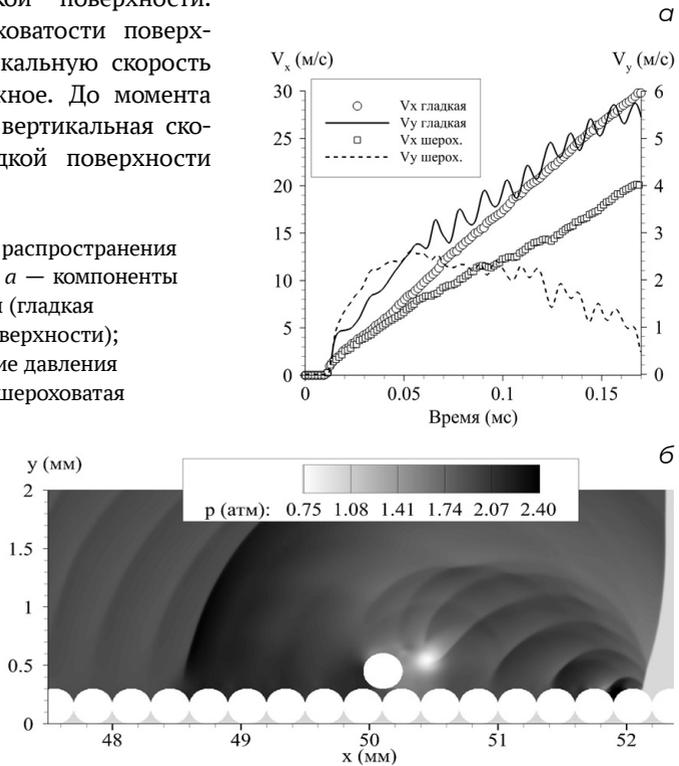
с расстоянием Δ между их центрами. Представленные здесь результаты соответствуют $\Delta = d$ (неподвижные частицы соприкасаются).

Математическая модель основана на решении двумерных уравнений Эйлера. Рассматривается прямоугольная область фиксированного размера с подвижными границами внутри, которые соответствуют внешней поверхности частиц. Вычислительный алгоритм основан на методе декартовых сеток, который широко использовался в наших предыдущих исследованиях. В [2] алгоритм сравнивался с другими методами погруженных границ для задачи отрыва круглой частицы от гладкой поверхности. Расчетная сетка была равномерной, с размером ячейки 5 мкм, что соответствует 60 ячейкам на диаметр частицы.

Рис. 2, а демонстрирует интегральную динамику движения частиц в горизонтальном и вертикальном направлениях как для гладких, так и для шероховатых поверхностей. Как наблюдалось в эксперименте, горизонтальная скорость (V_x) частицы на шероховатой поверхности значительно ниже, чем на гладкой поверхности.

Влияние шероховатости поверхности на вертикальную скорость (V_y) более сложное. До момента около 0,05 мс, вертикальная скорость для гладкой поверхности

Рис. 2. Динамика распространения круглой частицы: а — компоненты скорости частицы (гладкая и шероховатая поверхности); б — распределение давления при $t = 0,016$ мс (шероховатая поверхность)



ниже, чем для шероховатой поверхности. Это можно объяснить ударными волнами, отраженными от отдельных неподвижных частиц, которые влияют на подвижную частицу (рис. 2, б). Аналогичное объяснение дано в [1]. Причины, по которым для шероховатой поверхности V_y становится меньше после критического времени, рассматриваются в данной работе.

Список литературы

1. Suzuki T., Sakamura Y., Igra O., Adachi T., Kobayashi S., Kotani A., Funawatashi Y. Shock tube study of particles' motion behind a planar shock wave // Measurement Science and Technology. 2005. Vol. 16, No. 12. P. 2431–2436.

2. Сосин А. В., Сидоренко Д. А., Уткин П. С. Численное исследование взаимодействия ударной волны с подвижными вращающимися телами сложной формы // Компьютерные исследования и моделирование. 2021. Т. 13, № 3. С. 513–540.

МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Н. К. Лузгин, А. А. Сидоренко

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

В данной работе представлена методика обработки данных поверхностной визуализации в аэродинамическом эксперименте, которая включает в себя калибровку камеры и восстановление изображения на трехмерной поверхности модели, или проекции на какую-либо плоскость.

В аэродинамическом эксперименте при съемке моделей возникает несколько существенных ограничений. Во-первых, наблюдение объекта в общем случае ведется под некоторым ракурсом, который определен расположением оптических окон и возможностью установки камеры. Из-за этого даже плоская модель может наблюдаться в невыгодной проекции, а части моделей сложной формы иногда оказываются скрыты из поля зрения. Во-вторых, из-за того, что на пути оптического луча от модели до матрицы камеры расположены оптические окна и объектив, возникает дисторсия, т. е. оптическое искажение изображения. Все это затрудняет работу с полученными изображениями, и иногда может привести к неправильной трактовке результатов.

В настоящей методике также используются два этапа, но калибровка камеры является опциональной. Калибровка выполняется с использованием библиотеки OpenCV, обнаруживает углы черных и белых квадратов на мишени с известными характеристиками, размеченной в виде шахматной доски, и сохраняет результат в виде матрицы.

Для установления взаимосвязи реальных трехмерных координат каждой точки на поверхности модели и точек изображения необходимо использование реперных точек (маркеров) с известными координатами, равномерно распределенных на поверхности модели. В процессе обработки эти точки обнаруживаются на изображении. Для получения взаимного соответствия используется процедура интерполяции координат, реализованная при помощи тонкопластинчатых сплайнов. [2] Этот вид сплайна основан на модели

изгиба тонкой металлической пластины, где энергия изгиба зависит от высоты точек. Метод реализован в виде программы на языке Python с использованием библиотеки Skikit.

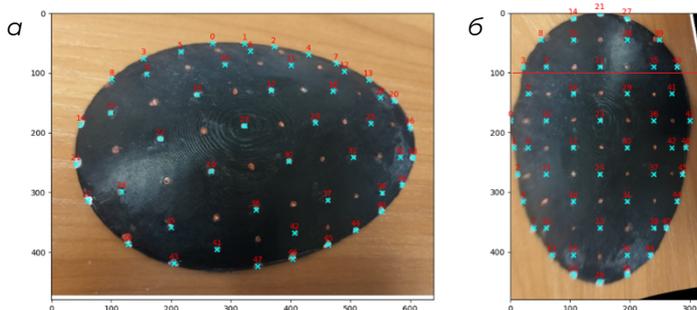


Рис. 1. Исходное (а) и восстановленное (б) изображение модели

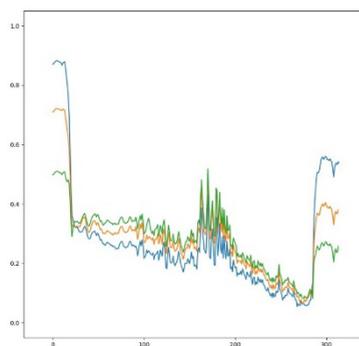


Рис. 2. Распределение яркости изображения в каналах RGB (y = 100 пикс.)

Для тестирования алгоритмов была использована напечатанная на 3D-принтере модель (рис. 1), представляющая собой часть эллипсоида вращения с углублениями для установки контрастных маркеров. Используется изображение модели, расположенной под произвольным углом к камере (рис. 1, а). На изображении голубыми крестиками отмечены положения маркеров, по которым производится интерполяция координат. Восстановленное изображение модели при виде сверху показано на рис. 1, б. На рис. 2 показано распределение яркости изображения в каналах RGB вдоль линии $y = 100$ Pix.

Список литературы

1. Cardone, G., Ianiro, A., dello Ioio, G. et al. Temperature maps measurements on 3D surfaces with infrared thermography. *Exp Fluids* 52, 375–385 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00348-011-1225-9>
2. Fred L. Bookstein. *Principal Warps: Thin-Plate Splines and the Decomposition of Deformatins.* (1989)

ЗАВИСИМОСТЬ ТУРБУЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ОТ УГЛА НАКЛОНА СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ЦИЛИНДРЕ*

А. А. Лукьянов, А. С. Лебедев

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

Управление структурой гидродинамического потока представляет большой интерес для широкого спектра прикладных задач. Например, влияние на отрыв потока с поверхности рабочего тела. Данное явление приводит к образованию крупномасштабных вихрей и развитию неустойчивости в сдвиговых течениях [1], которые порождают вредоносные шумы и вибрации в гидромашинах. Важным примером классической задачи со срывом вихрей является задача об обтекании круглого поперечно обтекаемого цилиндра [2]. Поскольку в литературе имеется большое количество теоретических и экспериментальных данных для круглого цилиндра, то с легкостью можно провести достоверный сравнительный анализ эффективности новых методов управления отрывными течениями.

В данной работе исследовано влияние угла наклона отверстий цилиндра на течение вблизи цилиндра, процессы развития и распада ближнего следа, а также возможности управления этими процессами. Для этого было рассмотрено турбулентное течение воды в гидродинамическом стенде, оборудованном PIV системой, в диапазоне чисел Рейнольдса $150 \times 10^5 < Re < 275 \times 10^5$, где $Re = U_b D / \nu$, U_b — среднерасходная скорость, D — диаметр канала, ν — коэффициент кинематической вязкости.

Эксперименты были проведены для гладкого стального цилиндра и цилиндра с отверстиями. Во втором цилиндре сделано пять сквозных отверстий, которые параллельны друг другу. Центральное отверстие расположено на половине длины цилиндра, остальные отверстия расположены симметрично по оси цилиндра с шагом 6 мм. Диаметр отверстий составлял 3 мм, что соответствует примерно 10 % от поперечного размера цилиндра.

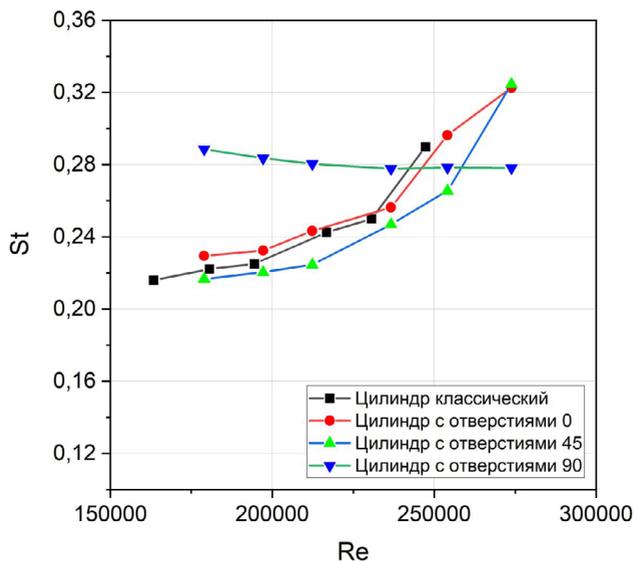
Был проведен сравнительный анализ средних характеристик потока и ближнего следа при изменении угла наклона отверстий относительно направления потока (0° , 45° и 90°) для разных чисел Рейнольдса. Были по-

* Исследование выполнено за счет мегагранта № 075-15-2024-620, https://megagrant.ru/labs/lab_rus_1082740.

© Лукьянов А. А., Лебедев А. С., 2025

строены зависимости размеров рециркуляционной зоны и чисел Струхаля от чисел Рейнольдса для каждой серии экспериментов.

На рисунке представлена зависимость числа Струхаля от числа Рейнольдса для классического цилиндра и цилиндра с отверстиями под разными углами поворота.



Зависимость числа Струхаля от числа Рейнольдса

Список литературы

1. King R. A review of vortex shedding research and its application // Ocean Engineering. 1977. Т. 4, № 3. С. 141–171.
2. Choi H., Jeon W.P., Kim J. Control of flow over a bluff body // Annual Review of Fluid Mechanics. 2008. Vol. 40. P. 113–139.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗОРАЗДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДНО-ГЕЛИЕВЫХ СМЕСЕЙ МЕМБРАННО-СОРБЦИОННЫМ МЕТОДОМ*

И. А. Майор, И. В. Казанин

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

Одной из актуальных задач современной газоразделительной технологии является эффективное выделение гелия из гелий-водородных смесей, получаемых после парового риформинга природного газа. Основные сложности разделения таких газовых пар является высокая проницаемость и низкая температура сжижения обоих компонент. В тоже время оба компонента являются крайне важными ресурсами как для «зеленой» энергетики, так и для промышленности и медицины, в связи с чем требуются развитие существующих методов их извлечения и очистки.

Мембранно-сорбционный метод представляется перспективным направлением для решения этой задачи, в виду своей простоты, эффективности и экономичности. В ИТПМ СО РАН был разработан мембранно-сорбционный метод разделения газовых смесей [1]. Особенность данного метода заключается в использовании в качестве сорбента — полых микросферических частиц из силикатных материалов, в частности микросфер, полость которых является внутренним объемом для проникающих через мембрану газов. Ранее в институте были проведены эксперименты по выделению гелия из гелий-водородных смесей газов [2] с помощью сорбентов на основе кремнеземных микросфер, которые показали хорошие темпы сорбции и селективности как для водорода, так и для гелия.

В данной работе представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований процесса газоразделения с помощью мембранно-сорбционного метода модельных водородно-гелиевых смесей. На первом этапе были проведены эксперименты по определению параметров процесса сорбции — коэффициенты массопереноса и удельного объема, согласно математической модели [3, 4], для каждого газового компонента. Затем с помощью

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН № 124021400036-7.

© И. А. Майор, И. В. Казанин, 2025

полученных коэффициентов было проведено численное моделирование процессов сорбции и десорбции, которое позволило определить оптимальные времена для каждого процесса.

На следующем этапе были проведены две серии экспериментов по мембранно-сорбционному разделению водородно-гелиевой смеси, с 10/90 % об. концентрацией гелия и водорода соответственно. Вторая серия эксперимента повторяла двухстадийный процесс обогащения исследуемой смеси с постоянной откачкой адсорбера во время десорбционных процессов. В результате было показано увеличение концентрации гелия с 10 % об. в исходной смеси до 93 % об. в обогащенной смеси после второго цикла. На каждой стадии степень извлечения составила около 40 %.

Для всех экспериментов был проведен хроматографический анализ проб исходных, обедненных и обогащенных газовых смесей. Благодаря этому было сделано сравнение экспериментальных результатов с расчетными значениями для процесса газоразделения, которое показало хорошее соответствие экспериментальных и расчетных значений. Данные результаты подтверждают применимость используемой математической модели, что позволяет использовать ее для решения оптимизационных задач для процессов газоразделения.

Список литературы

1. Фомин В. М., Зиновьев В. Н., Казанин И. В., Лебига В. А., и др. Способ разделения многокомпонентной парогазовой смеси // Патент РФ № 2508156. МКП В01D 53/02 (2006.01).
2. Казанин И. В., Зиновьев В. Н., Прокопьев К. Э., Верещагин А. С., Фомин В. М. Исследование водородной проницаемости полых микросферических частиц из силикатных материалов // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 21–25 авг. 2023 г.) сб. тез. докл.: в 4 т. Т. 4. Материалы симпозиумов и Исторической сессии. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. С. 164–165.
3. Верещагин А. С., Казанин И. В., Зиновьев В. Н. и др. Математическая модель проницаемости микросфер с учетом их дисперсионного распределения // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 2. С. 88–96.
4. Верещагин А. С., Казанин И. В., Зиновьев В. Н. и др. Определение гелиевой проницаемости микросферических мембран по экспериментальной временной зависимости поглощения ими гелия // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92, № 4. С. 1059–1064.

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ВИХРЕЙ НА ОТРЫВ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ

В. В. Маркин, П. А. Поливанов

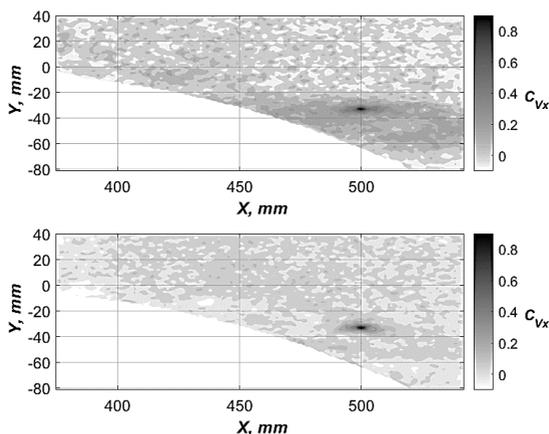
*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

На текущий момент изучение методов активного управления пограничным слоем (УПС) активно рассматривается для улучшения взлетно-посадочных характеристик перспективных летательных аппаратов. Одним из наиболее энергетически выгодных методов являются струйные вихрегенераторы, которые активно исследуются [1]. К настоящему времени накоплен богатый опыт изучения и применения струйных методов УПС, однако в большинстве исследований основной упор делается на измерение глобальных эффектов воздействия вихрегенерирующих устройств на течение, таких, как уменьшение размеров отрывных зон, увеличение критического угла атаки, рост коэффициента подъемной силы и других средних характеристик потока или обтекаемого тела. В то же время практически не уделяется внимания влиянию продольных вихрей на нестационарные процессы, протекающие в турбулентном пограничном/сдвиговом слое. Выявление особенностей этого взаимодействия позволит улучшить понимание физических механизмов подавления/затягивания отрывного течения. Кроме того, прояснение нестационарных механизмов взаимодействия необходимо для совершенствования методов УПС на базе струйных устройств. Данная работа концентрируется на исследовании характерных масштабов турбулентности в отрывной области и влияния на них струйных вихрегенераторов.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-503 НГТУ с открытой рабочей частью диаметром 1,2 м при скорости набегающего потока 10 и 25 м/с. В рабочей части трубы располагалась модель, представляющая собой пластину с размерами 1000 × 740 × 90 мм, носовая часть модели выполнена в виде полуэллипса, хвостовая — виде обратного уступа размерами 200 × 740 × 90 мм и радиусом образующей 500 мм. На расстоянии 50 мм выше по потоку от начала уступа параллельно размаху пластины располагался массив из 19 сопел вихрегенераторов, каждое диаметром 2,5 мм.

Измерение параметров потока за вихрегенератором выполнялись PIV и термоанемометрическими методами. Плоскость развертки лазерного ножа PIV-комплекса располагалась в плоскости симметрии модели, сканирование термоанемометрическим датчиком производилось в сечениях, перпендикулярных вектору скорости набегающего потока.

На рисунке продемонстрированы величины коэффициентов корреляции $\langle V_x \rangle$ в точке, в случае выключенного (вверху) и включенного (внизу) вихрегенератора. Размеры областей с повышенным коэффициентом корреляции можно интерпретировать как размеры локальных турбулентных структур, существующих в этих областях пространства.



Величины коэффициентов корреляции $\langle V_x \rangle$

В работе на основе корреляционного анализа определены характерные пространственные и временные масштабы турбулентной структур. В результате исследования установлено, что активация вихрегенераторов приводит к значительному изменению масштабов турбулентных структур, которое зависит от интенсивности воздействия. Полученные результаты согласуются с предыдущими исследованиями [2].

Список литературы

1. Greenblatt D., Wygnanski I.D. The control of flow separation by periodic excitation // Progress in Aerospace Sciences. 2000. Vol. 36, No. 7. P. 487–545.
2. Маркин В. В., Поливанов П. А., Влияние продольного вихря на характеристики турбулентного пограничного слоя // ПМ: 2024 (Новосибирск, Шерегеш, 10–18 марта 2024 г.) : тез. докл. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2024. С. 115–116.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ КАВЕРНЕ

М. Г. Маслов, С. И. Игрушкин, М. Ю. Гантман, Т. В. Уткина

*АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения
им. И. И. Африкантова», Нижний Новгород*

В настоящей работе исследовались процессы, связанные с обтеканием каверны воздушным потоком.

При определенных условиях обтекания каверны, в потоке могут генерироваться крупномасштабные вихревые структуры, вызывающие пульсации давления высокой амплитуды. Данные пульсации способны приводить к повышенным уровням шума и вибрации изделий, в проточной части которых находятся подобные элементы.

Одним из механизмов возникновения нестационарных процессов в каверне, является потеря устойчивости сдвигового слоя. Согласно работам [1–3], одной из ключевых особенностей нестационарного процесса в каверне, является наличие обратной связи между колебаниями в области взаимодействия сдвигового слоя с препятствием (нижней по потоку кромкой каверны) и в зоне его отрыва (верхней по потоку кромки). Образование данной связи возможно за счет возникновения и распространения в каверне волн давления. Таким образом, при исследовании потока в каверне необходимо принимать в расчет сжимаемость рабочей среды.

В данной работе приводятся результаты исследований потока при обтекании прямоугольной каверны с применением численных расчетов. Характерной особенностью приведенных результатов исследований является дозвуковое течение рабочей среды (число Маха $M < 0,2$), а также автоколебательный характер процесса, включающий колебания рабочей среды на собственных частотах связанных с длинами подводящих и отводящих участков трубопровода.

По результатам акустических и аэродинамических расчетов, получены формы собственных колебаний рабочей среды и спектры пульсаций давления в точке. Показана возможность моделирования данных процессов с помощью численных методов. Сравнение результатов испытаний каверны с результатами численных аэродинамических расчетов, показало примени-

мость последних для решения инженерных целей и задач при разработке новых образцов оборудования с аналогичной конструкцией.

Список литературы

1. Абдрашитов Р.Г., Архиреева Е. Ю., Даньков Б. Н. Механизмы нестационарных процессов в протяженной каверне // Учен. зап. ЦАГИ. 2012. Т. 43, № 4. С. 39–56.
2. Rockwell D., Naudascher E. Self-Sustaining Oscillations of Flow Past Cavities // Journal of Fluids Engineering. 1978. Vol. 100. P. 153–165.
3. Rossiter J. E. Wind Tunnel Experiments on the Flow Over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds // Royal Aircraft Establishment Technical Rept. 64037, 1964.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗОНАТОРОВ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ ПОЛОСТИ В ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

М. Г. Маслов, С. И. Игрушкин,
М. Ю. Гантман, Т. В. Уткина, Е. И. Шмелев

*АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения
им. И. И. Африкантова», Нижний Новгород*

В настоящей работе исследовалось влияние резонатора Гельмгольца для устранения высокочастотных колебаний, связанных с возбуждением акустического резонанса кольцевой полости транзитным потоком.

При движении воздушного потока вдоль открытой границы полости могут возникать интенсивные акустические колебания [1]. Данные колебания способны приводить к повышенным уровням шума и вибрации изделий, что вызывает необходимость разработки мероприятий по борьбе с подобными колебаниями.

В настоящей работе рассматривается глухая кольцевая полость, опоясывающая трубу с локальным сужением. Полость соединяется с трубой узкой кольцевой щелью. Согласно терминологии [1] колебания в данной полости следует отнести к автоколебаниям резонансного типа, поскольку данные колебания связаны с возбуждением акустического резонанса полости. Исследования показали, что благодаря эффекту синхронизации, резонансные автоколебания в рассматриваемой полости наблюдаются в некотором диапазоне скоростей транзитного потока, причем одновременно возбуждаются несколько мод собственных колебаний полости.

В данной работе в качестве средства устранения высокочастотных автоколебаний в глухой кольцевой полости предложено использовать резонатор Гельмгольца. В работе проведены расчетно-экспериментальные исследования с применением численных методов моделирования автоколебаний, учитывающих эффекты сжимаемости и турбулентности, по определению влияния и эффективности резонатора Гельмгольца на снижение

уровней колебаний. Показана возможность численного моделирования на основе RANS подхода эффектов гашения колебаний с помощью резонатора Гельмгольца.

Список литературы

1. Rockwell D., Naudascher E. Review-self-sustained oscillations of flow past cavities // J. Fluids Eng., 1978, Vol. 100, Iss. 2. P. 152-165.

МЕХАНИЧЕСКИЙ ТЕПЛОВЫЙ КЛЮЧ ДЛЯ ЕДИНИЧНОГО КАСКАДА КРИОГЕННОГО МАГНИТНОГО РЕФРИЖЕРАТОРА*

А. В. Маширов, К. А. Колесов, О. В. Белова

*Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Москва*

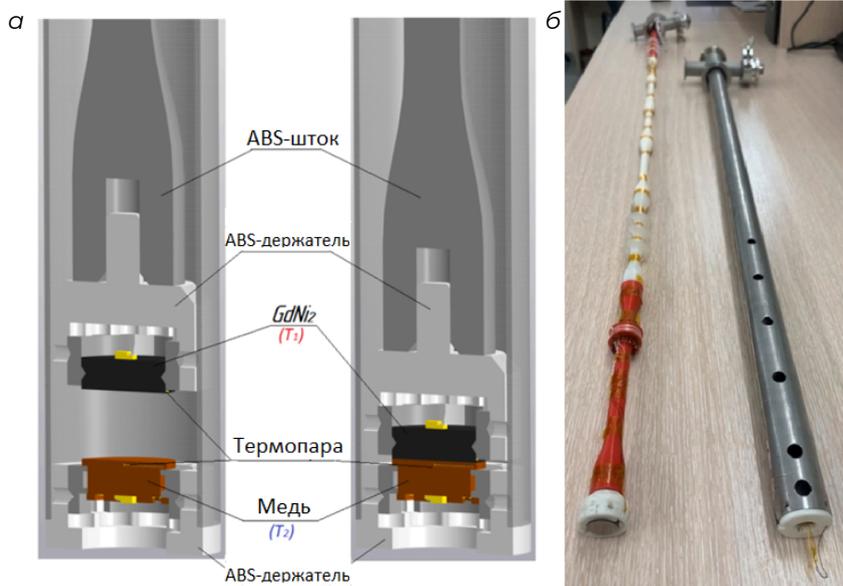
При применении твердотельных криогенных магнитных рефрижераторов для ожижения, хранения и транспортировки природного газа или водорода при создании и поддержании температуры 120 К (20 К) для различных температурных уровней могут использоваться те или иные магнитокалорические рабочие вещества [1]. На данный момент исследовано достаточно большое количество потенциальных рабочих тел для покрытия температурного диапазона от 120 К (20 К) до 293 К [2]. Использование каскада в основе разработки криогенного магнитного рефрижератора основывается на использовании механических или газовых тепловых ключей, периодически разрывающих и создающих тепловую связь магнитокалорического рабочего тела с выше- и нижележащими каскадами. Известно, что в криогенных теплообменниках обычно разница температур между теплопроводящим элементами и рабочим телом должна быть равна 3–5 % температурного уровня, при уменьшении этой разницы увеличиваются габариты и масса теплообменников данного температурного уровня [3]. Также количество тепла, передаваемое от нижележащего каскада к вышележащему, возрастает по мере движения вверх, соответственно, массы рабочих тел должны возрастать в каждой последующей ступени [4].

Экспериментально нами было показано, что один каскад, работающий на температурном уровне 75 К по холодильному циклу Брайтона, может быть реализован при усилии на механическом ключе 350 МПа в температурном интервале около 4 К (см. рисунок). Тогда в прототипе криогенных магнитных рефрижераторов работающем от 120 К понадобится создать около 43 каскада с синхронно работающими механическими тепловыми

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-79-10197, <https://rscf.ru/project/20-79-10197/>.

© Маширов А. В., Колесов К. А., О. В. Белова 2025

ключами. Создание каскадной систем охлаждения будет сопровождаться уменьшением надежности потенциального прототипа, и появлением задач обеспечения безотказной работы. На основе конструктивных элементов крепления и прижатия из ABS-пластика показано срабатывание криогенного механического ключа при усилии от 100 кПа до 5 МПа. Время срабатывания криогенного механического ключа зависит среди прочего от силы прижатия, шероховатости, механических свойств контактирующих элементов. Нами рассматриваются как рабочие параметры механического теплового ключа влияют на холодопроизводительность прототипов криогенного магнитного рефрижератора и таким образом определяют возможность применения данного нового типа холодильных устройств при охлаждении природного газа.



Криогенный механический тепловой ключ: а — 3D-изображение механического теплового ключа; б — изображение механического теплового ключа в разборе

Список литературы

1. Barclay J., Brooks K., Cui J., Holladay J., Meinhardt K., Polikarpov E., Thomsen E. Propane liquefaction with an active magnetic regenerative liquefier // Cryogenics. 2019. Vol. 100. P. 69–76.

2. Franco V., Blázquez J.S., Ipus J. J., Law J. Y., Moreno-Ramírez L.M., Conde A. Magnetocaloric effect: From materials research to refrigeration devices // Progress in Materials Science. 2018. Vol. 93. P. 112-232.

3. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы. М.: Машиностроение, 1996.

4. Бродянский В.М., Семенов А.М. Термодинамические основы криогенной техники. М.: Энергия, 1980.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ С ТРЕНИЕМ В КАНАЛАХ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ

А. Ю. Мельников

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

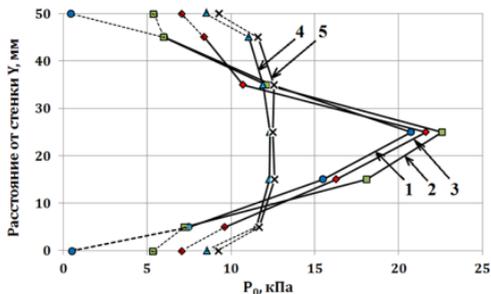
Известно, что при дозвуковых скоростях потока на входе в канал постоянного сечения скорость течения будет увеличиваться [1] за счет нарастания пограничного слоя. Предельной скоростью будет являться скорость на выходе канала, которая может достигать максимального значения $M = 1$. Длина канала с дозвуковой скоростью на входе, в данном случае, не имеет ограничений, и при стремлении ее к бесконечности расход газа на входе будет стремиться к нулю.

Течение вязкого газа со сверхзвуковой скоростью на входе в канал представляет собой более сложный, который требует глубокого анализа. Несмотря на значительное количество работ в данной области [2–4], многие аспекты такого течения остаются недостаточно изученными из-за сложности возникающих картин течения. Важно отметить, что такое течение может одновременно содержать как сверхзвуковые, так и дозвуковые области ввиду образования псевдоскачка при определенных условиях.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований сверхзвукового потока газа в каналах постоянного сечения. Показано, что при длине канала $L/D = 32$ и сверхзвуковой скорости на входе, поток на выходе может оставаться также сверхзвуковым с меньшей скоростью.

По мере повышения противодавления в емкости, куда происходит истечение, происходит образование псевдоскачка и при увеличении противодавления псевдоскачок перемещается против потока вплоть до нарушения режима течения на входе. Получены продольные распределения статического давления в канале по времени, а также профили давления в конце канала (рис. 1).

Были проведены экспериментальные исследования более длинного канала $L/D=64$. Было получено, что в отличие от короткого канала, псевдо-

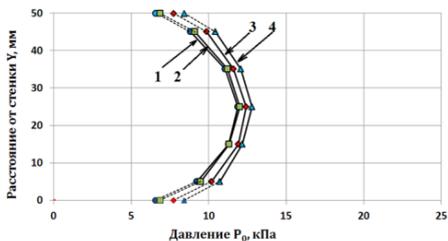


Короткий канал $L/D=32$

	P/P_0
1	0,005
2	0,054
3	0,072
4	0,086
5	0,094

Рис. 1. Профили давления для канала $L/D = 32$

скачок образуется в определенном сечении канала и его начальное положение зависит от начального числа Маха потока. Аналогично были получены продольные распределения статического давления вдоль канала и профили давления в выходном сечении (рис. 2).



Длинный канал $L/D=64$

	P/P_0
1	0,01
2	0,06
3	0,074
4	0,082

Рис. 2. Профили давления для канала $L/D = 64$

Список литературы

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1: Учеб. руководство для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 600 с.
2. 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.I.: Nova Science Publishers, 2012. P. 207–224.
3. Пензин В. И. Торможение сверхзвукового потока в каналах / Центр. аэрогидродинамич. ин-т. М., 2012. 158 с.
4. О. В. Гуськов, В. И. Копченов, И. И. Липатов, В. Н. Острась, В. П. Старухин Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 168 с.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ КЛИНА ПРИ СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА*

И. В. Меньщикова, В. И. Запрягаев, И. Н. Кавун

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

Представлены результаты исследования взаимодействия струи с поверхностью клина при наличии набегающего потока, несоосного направлению истечения струи. На рис. 1, а показана схема исследуемой задачи: 1 — модель, 2 — осесимметричное сопло, 3 — сверхзвуковая нерасчетная струя, 4 — положение скачка уплотнения, формируемого клином в набегающем потоке при отсутствии струи, 5 — положение скачка при наличии одиночной пристенной струи. На рис 1, б показана шлирен-фотография исследуемой струи.

На рис. 2 показана структура течения в области взаимодействия струи с поверхностью клина: распределение числа Маха в продольном сечении (а) и распределение давления на поверхности модели (б). Число Маха набегающего потока $M_\infty = 2$. Расстояние от оси сопла до поверхности клина $H/D_a = 3$ (D_a — диаметр выходного среза сопла). Параметры струи: число Маха на срезе сопла $M_a = 3$, параметр $n_{pr} = 1000$ (отношение полного давления

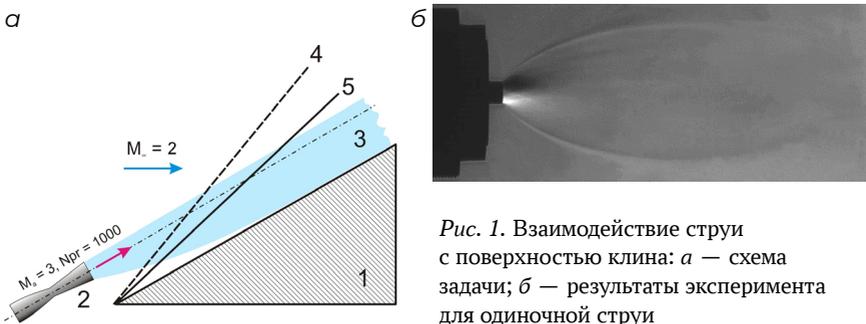


Рис. 1. Взаимодействие струи с поверхностью клина: а — схема задачи; б — результаты эксперимента для одиночной струи

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН с использованием оборудования ЦКП «Механика».

© Меньщикова И. В., Запрягаев В. И., Кавун И. Н., 2025

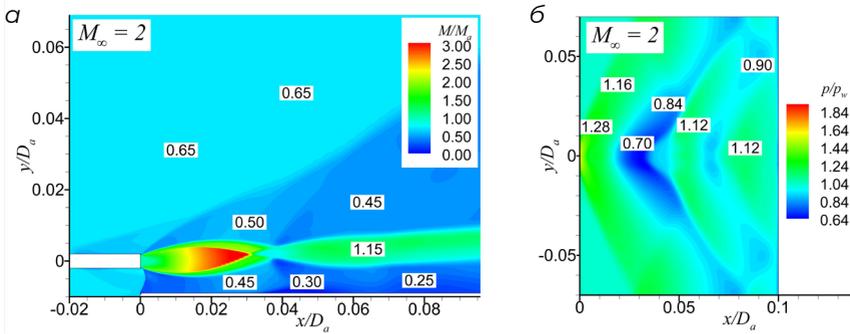


Рис. 2. Результаты численного исследования течения: а — распределение числа Маха в плоскости симметрии; б — распределение давления на поверхности клина

на срезе сопла к статическому давлению в окружающей струю пространстве). Угол между направлением истечения струи и набегающего потока равен 20 градусов.

Представленные данные указывают на возможность создания на поверхности модели областей с повышенными или пониженными силовыми нагрузками при воздействии струйного течения.

ДИНАМИКА АДсорБИРОВАННЫХ СЛОЕВ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ*

А. И. Мизёв

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

подавляющее большинство гидродинамических систем, с которыми сталкиваются исследователи в лабораторном эксперименте или при изучении природных или технологических процессов, являются многофазными и включают границу раздела «жидкость — жидкость» или «жидкость — газ». Изучение процессов, происходящих на границе раздела двух жидких сред или вблизи нее, является предметом интенсивных исследований в течение последних нескольких десятилетий. Учет такого рода явлений становится особенно важным в задачах, где вклад поверхностных эффектов является преобладающим: движение капель и пузырьков, устойчивость тонких пленок, дренаж в пенах и т. д. Наличие границы раздела приводит не только к появлению дополнительной границы в системе со своими собственными индивидуальными граничными условиями для потока импульса, энергии или массы, но и порождает дополнительные механизмы неустойчивости. Ситуация существенно усложняется, если в гидродинамической системе присутствует поверхностно-активное вещество (или сурфактант). Благодаря амфифильной структуре молекулы сурфактанта накапливаются на границе полярной и неполярной жидкостей, что соответствует наиболее энергетически выгодной конфигурации, где они формируют отдельную двумерную фазу в виде монослоя. Для описания таких двумерных объектов требуется выписать отдельную систему уравнений и задать достаточно большое количество параметров: уравнение состояния с учетом возможных фазовых переходов, поверхностную диффузию, коэффициенты адсорбции/десорбции для растворимых сурфактантов, поверхностные реологические характеристики. Наличие течения в объемной фазе приводит к возникновению движения и в слое. Однако слой ПАВ не является пассивной примесью, переносимой потоком жидкости, он активно взаимодействует с этим

* Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

© Мизёв А. И., 2025

потоком посредством целого букета эффектов, начиная с «простого» эффекта Марангони и заканчивая, на первый взгляд, экзотическими двумерными реологическими эффектами.

Несмотря на то что такого типа системы повсеместно встречаются как в природе, так и в различных технологических процессах, единого подхода, учитывающего все аспекты такого рода задач, до сих пор не выработано. Причин этому можно выделить сразу несколько. Во-первых, решение таких задач требует междисциплинарного подхода, включающего наличие у исследователя исчерпывающих знаний в области как физической химии, так и гидродинамики. Вторым важным фактором, сдерживающим развитие полноценных моделей в описании такого рода задач, является отсутствие доступных экспериментальных методов визуализации и измерения пространственного распределения сурфактанта. В результате о распределении сурфактанта судят косвенно по доступным к измерению величинам: поля скорости и температуры, поверхностное натяжение и т. д. Однако интерпретация результатов затруднена тем фактом, что различные процессы в адсорбированном слое могут приводить к идентичным видимым последствиям. Во многих отношениях сурфактанты ведут себя как «скрытые переменные», которые невозможно измерить напрямую, но которые существенно влияют на потоки жидкости. Довольно часто, при некорректной постановке и подготовке эксперимента, сам факт наличия сурфактанта в системе является для исследователя скрытым параметром. Кроме того, для интерпретации наблюдений требуется наличие работающих моделей для описания динамики и переноса сурфактанта. Получается замкнутый круг: для интерпретации экспериментов необходимо наличие адекватных моделей, развитие которых осложняется недостаточной экспериментальной базой.

Разумным выходом из описанной ситуации представляется развитие экспериментальных подходов и методов, которые позволяли бы еще на стадии планирования эксперимента выделять такие постановки, которые бы позволяли изолированно изучать различные аспекты столь сложной задачи, оставляя одни эффекты и исключая остальные. В докладе будут представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных как нашей группой в течение нескольких последних лет, постановка которых и выбор сурфактантов позволили сузить количество игровых и сосредоточиться на изучении определенных аспектов задачи.

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА*

А. А. Митрофанов, К. М. Моисеева

Томский государственный университет, Томск

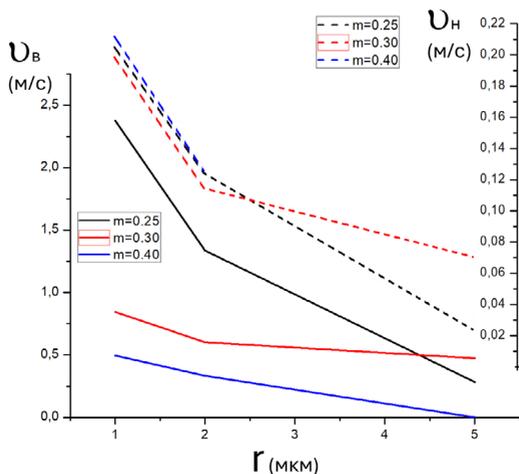
В работах [1–2] предложена математическая модель зажигания и горения частиц алюминия в ламинарном потоке воздуха, основанная на подходах динамики двухфазных реагирующих сред и согласованная с экспериментальными данными. Модель горения аэровзвеси порошка алюминия [2] не учитывала влияние лучистого теплопереноса в газозвзеси. И хотя в работе [3] утверждается, что для одиночных мелкодисперсных частиц алюминия влиянием лучистого теплопереноса можно пренебречь, присутствие лучистого теплообмена и теплопереноса может повлиять на скорость горения аэровзвеси порошка алюминия. В работах [4, 5] указано, что лучистый теплообмен во взвесах пыли достаточно сложен, и эффективная степень черноты для газозвзесей зависит от материала, размера, концентрации частиц пыли, а также от состава газа и не определяется степенью черноты материала частиц.

В настоящей работе на основе моделей [2, 6] выполнено численное исследование скорости распространения пламени в аэровзвеси порошка алюминия в присутствии лучистых теплотерь. Предполагается, что аэровзвесь порошка алюминия распределена в воздухе равномерно. Зажигание взвеси происходит в тонкой части левого торца, а правая граница канала удалена на бесконечное расстояние от левой границы. Коэффициенты теплопроводности и диффузии газа зависят от температуры, частицы алюминия воспламеняются при достижении температуры зажигания. Скорость гетерогенной химической реакции на частицах описывается с учетом массоотдачи и массообмена. Учитываются тепловое и динамическое взаимодействие между частицами и газом. Полагается, что при горении частицы алюминия радиус алюминия в частице уменьшается, радиус самой частицы растет за счет нарастания оксидного слоя на поверхности частицы. Метод решения задачи и прочие допущения описаны в работе [2].

* Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2025-0012).

© Митрофанов А. А., Моисеева К. М., 2025

В расчетах варьировались радиус частиц алюминия от 1 до 5 мкм, коэффициент степени черноты от 0 до 0,4, массовая концентрация частиц от 0,25 до 0,4 кг/м³. Результаты численного исследования представлены на рисунке.



Видимая и нормальная скорости горения аэровзвеси порошка алюминия при степени черноты 0,1

Получено, что при увеличении радиуса и массовой концентрации частиц видимая и нормальные скорости уменьшаются. Учет лучистого теплопереноса снижает видимую и нормальную скорости горения.

Список литературы

1. Dreizin E.L. On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion // Combustion and Flame. 1999. Vol. 117. P. 841–850.
2. Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Дементьев А.А. Определение критических условий искрового зажигания бидисперсного порошка алюминия в воздухе // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55, № 4. С. 26–33.
3. Крюков А.Ю., Малинин В.И. Зависимость размера зоны пламени одиночных частиц алюминия от давления // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2020. № 60. С. 45–54.
4. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. Л.: Госэнергоиздат, 1962. 332 с.
5. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. М.: Издательство академии наук СССР, 1958. 606 с.
6. Крайнов А.Ю. Влияние лучистого теплопереноса на минимальную энергию искрового зажигания газозвзвесей // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 3. С. 16–24.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В СВОБОДНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ*

А. А. Некрасова, М. И. Сорокин, М. П. Токарев

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

Искусство управления потоком зародилось в доисторические времена, когда люди создавали обтекаемые копья и стрелы, не зная принципов аэродинамики [1]. С развитием науки Прандтль ввел теорию пограничного слоя [2], что стало основой для рационального проектирования устройств управления потоком. Управление потоком разделяется на пассивное и активное. Пассивное управление зачастую подразумевает внесение изменений в конструкцию устройства, при этом в поток не вносится дополнительная энергия. С развитием технологий все большее внимание уделяется методам активного управления, при котором подразумевается внесение дополнительной энергии в поток. Примером реализации активного управления могут служить актуаторы, вторичные струи или щелевой вдув. Методы управления часто применяются для оптимизации перемешивания в струйных течениях или снижения аэродинамического сопротивления при обтекании тел. При этом для оценки степени перемешивания используют различные методы.

В рамках проделанной работы была обучена сверточная нейронная сеть с заданной архитектурой (рис. 1). В качестве входных данных использовались предварительно обработанные поля мгновенной скорости (рис. 2). Для разметки данных применялся алгоритм IVD (англ. *instantaneous vorticity deviation*) (рис. 3) [3]. Выходом нейронной сети является массив значений, отражающих степень принадлежности каждой точки к вихревым структурам.

В результате обучения были получены следующие данные: количество идентифицированных вихревых структур, их площади и координаты. На основании анализа полученных результатов была предложена методика оценки эффективности перемешивания на основе 2D PIV (англ. *particle image velocimetry*) данных в свободной турбулентной струе.

* Исследование выполнено за счет мегагранта № 075-15-2024-620, https://megagrant.ru/labs/lab_rus_1082740/

© Некрасова А. А., Сорокин М. И., Токарев М. П., 2025

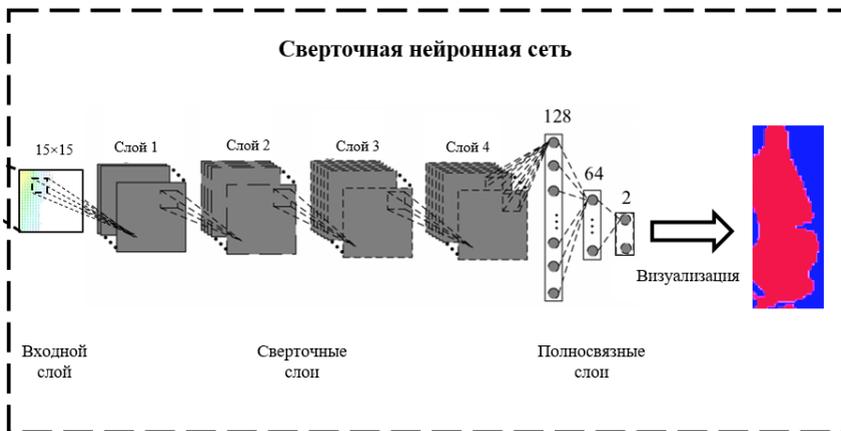


Рис. 1. Архитектура нейронной сети

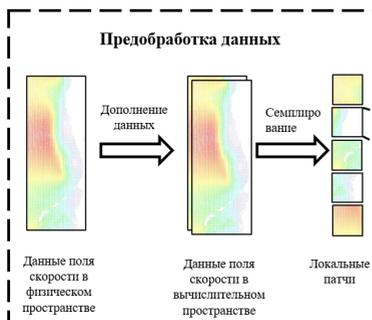


Рис. 2. Предобработка данных

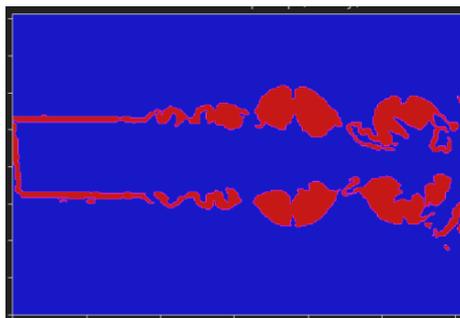


Рис. 3. Результат работы алгоритма IVD

Список литературы

1. Gad-el-Hak M. Flow control. 1989.
2. Prandtl L. Uber Flussigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung // Verhandl. 3rd Int. Math. Congr. Heidelberg (1904), Leipzig, 1905.
3. Haller G. et al. Defining coherent vortices objectively from the vorticity // J. of Fluid Mechanics. 2016. Vol. 795. P. 136–173.

СОПРЯЖЕНИЕ МЕТОДОВ ГИДРОДИНАМИКИ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА

А. Н. Нимаков, Г. Д. Рублев, С. А. Дьячков

*Всероссийский научно-исследовательский
институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва*

Для расширения круга решаемых задач предлагается использовать алгоритм сопряжения методов конечного объема (FVM) и сглаженных частиц (SPH) [1], который позволяет выполнять одновременный расчет различными методами в разных пространственных областях. Для метода FVM используется римановский решатель [2], учитывающий скорость движения контактного разрыва, также, как и для SPH. Шаг по времени выбирается исходя из критерия Куранта для каждого метода, а интегрирование выполняется с общим минимальным временным шагом. Вблизи границы раздела создаются виртуальные ячейки и частицы, для которых данные пересчитываются с реальных частиц и ячеек, соответственно. Для обеспечения более гладкого и точного перехода вещества из области ячеек в область частиц, а также для сохранения сплошности среды SPH, был разработан алгоритм генерации виртуальных частиц, работающий совместно с методом сдвига частиц (*particle shifting technique, PST*) [3] и методом определения частиц свободной поверхности (*free-surface detection*) [4]. Этот комплексный алгоритм осуществляет генерацию частиц и последующий их сдвиг, что позволяет равномерно распределить частицы по области задачи и обеспечить непрерывность поля плотности.

Результат применения алгоритма сопряжения продемонстрирован на серии тестовых примеров, показывающих достаточную точность сохранения массы, импульса и энергии потока при переходе вещества через интерфейсную область.

Список литературы

1. Паршиков А. Н. Гидродинамика сглаженных частиц с использованием алгоритмов межчастичного контакта // Журнал вычислительной физики. 2002. Т. 180, № 1. С. 358–382.
2. Меньшов И. С. О сложной задаче Римана для потоков жидкости из нескольких материалов // Журнал численных методов в жидкостях. 2014. Т. 76, № 2. С. 109–127.

© Нимаков А. Н., Рублев Г. Д., Дьячков С. А., 2025

3. Michel J., et. all. On Particle Shifting Techniques (PSTs): Analysis of existing laws and proposition of a convergent and multi-invariant law // J. of Computational Physics. 2022. Vol. 459, No. 110999.
4. Marrone S., et. all. Fast free-surface detection and level-set function definition in SPH solvers // J. of Computational Physics. 2010. Vol. 229, No. 10. P. 3652–3663.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЯЗКОУПРУГОГО И ВЯЗКОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПАСТООБРАЗНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАМКАХ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА*

Ю.О. Носов

Пермский политехнический университет, Пермь

На настоящее время активное развитие вычислительной техники позволяет создавать численные аналоги конструкций для прогнозирования работы конструкции на всем жизненном цикле в целом и определенном временном промежутке в частности. Если ранее для минимизации временных затрат на исследование конструкции в рамках компьютерного инжиниринга приходилось упрощать математические модели поведения материалов, то сейчас можно использовать более сложные, частные модели, которые качественно и количественно описывают реальные исследуемые объекты [1]. В рамках исследования рассматривается один из важных приоритетных направлений Российской Федерации — развитие транспортно-логистических систем в целом и мостовых сооружений в частности. Объектом исследования является опорная часть, важной функцией которой является передача несущей нагрузки с пролетного строения на неподвижное основание.

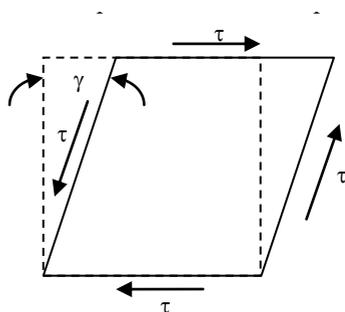
К материалам, применяемым в мостостроительной отрасли, предъявляются повышенные требования по качеству, долговечности и прочности, так как безремонтная работа конструкции составляет более 15 лет в рамках постоянного контактного взаимодействия сопрягаемых поверхностей [2]. Следовательно, для описания математических моделей необходимо учитывать фрикционные характеристики материалов, а также зависимость физико-механических характеристик от температуры и других факторов.

В рамках работы рассматривается набор пастообразных смазочных материалов активно применяемых в мостостроительной деятельности: ЦИАТИМ-221; ЦИАТИМ-221F. На первом этапе исследования проведено экспериментальное исследование динамических характеристик смазок

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 25-29-00470.

© Носов Ю.О., 2025

на широком диапазоне рабочих температур и скоростей деформирования материала. На втором этапе полученные экспериментальные данные используются в авторском алгоритме [3] для идентификации математической модели поведения материала с возможностью дальнейшей интеграции в современные системы автоматизированного проектирования (ANSYS, ABAQUS и др.). В рамках работы алгоритма создается численный эксперимент, соответствующий натурному эксперименту (см. рисунок), после чего происходит итерационный поиск параметров модели, который останавливается при достижении погрешности менее 5 %.



Численный эксперимент

Для описания математической модели поведения материалов использовались три математические модели: ряды Прони (вязкоупругая модель); частный случай модели Ананд (вязкоупругая модель); расширенная модель Ананд (вязкоупругопластическая модель). Установлено, что вязкоупругая модель удовлетворительно описывает поведение смазки и может применяться для описания материалов при низких температурах. Для описания полного диапазона рабочих температур необходимо использовать более сложную вязкоупругопластическую модель, например расширенную модель Ананд.

Список литературы

1. Афанасьев А. А. Цифровая трансформация промышленного производства: теоретические аспекты и политика ее реализации. М.: Институт Экономики РАН, 2024.
2. Bogdanova A. P., Kamenskikh A. A., Nosov Y. O. The Geometric Configuration of Lubricant Recesses of the Polymer Sliding Layer of the Bearing // Designs, 2023, Vol. 7, Art. 144.
3. Каменских А. А., Носов Ю. О. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618695 Российская Федерация. Идентификация математической модели вязкоупругого поведения тела Максвелла на основе рядов Прони: № 2023617843; заявл. 27.04.2023; опубл. 27.04.2023; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

ФОРМИРОВАНИЕ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ОТ ТРЕЩИНЫ ДО МЕГАРАЗРЫВА*

А. А. Остапчук

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

Сильные землетрясения зарождаются в зонах тектонических разломов и инициируются при разрушении контактных пятен. В процессе эволюции рост тектонических напряжений вызывает внутренние структурные изменения геосреды в зоне контактных пятен, которые сопровождаются излучением слабых сейсмических событий. Так как зоны нуклеации землетрясений скрыты от прямого наблюдения на большой глубине, то требуются методы, которые позволили бы с высокой детализацией картировать данные зоны и исследовать их динамику.

Одну из важнейших ролей в формировании и реализации сильнейших землетрясений играет реология тектонического разлома. Контактные пятна, сформированные на разломе, обладают не только высоким фрикционным сопротивлением, но и свойством скоростного разупрочнения (СР), в то время как относительно разгруженные области между пятнами характеризуются, как правило, низкой фрикционной прочностью и свойством скоростного упрочнения (СУ) [1]. В очаге сильных землетрясений происходит почти одновременный срыв нескольких контактных пятен. Разрыв стартует на периферии пятна со свойством СР, на участках со свойством СУ скорость разрыва быстро снижается, вновь увеличиваясь в соседних СР областях. Если размер СУ участка достаточно велик, то происходит остановка разрыва.

В условиях, когда динамика системы не может быть полностью описана системой дифференциальных уравнений, или в случаях, когда физика процесса до конца не ясна, высокую эффективность демонстрируют алгоритмы машинного обучения [2]. Пространственно-временной анализ фоновой сейсмичности с использованием методов нечеткой кластеризации позволяет с высокой детальностью картировать расположение крупных контактных пятен.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-77-10087).

© Остапчук А. А., 2025

Сценарии развития разрывов сильнейших землетрясений могут предполагать разрушение как отдельного контактного пятна, так и нескольких соседних пятен синхронно. Для каждого пятна имеется характерное время повторяемости разрушения, и, следовательно, пятна могут многократно испытывать разрушения независимо, прежде чем произойдет синхронизация разрушения. Особенности синхронизации разрушения двух и более асперити являются критически важными для оценки геодинамической опасности и в настоящий момент являются нерешенной задачей.

Список литературы

1. Кочарян Г. Г., Беседина А. Н., Гридин Г. А., Морозова К. Г., Остапчук А. А. Трение как фактор, определяющий излучательную эффективность подвижек по разломам и возможность их инициирования. Состояние вопроса // Физика Земли. 2023. № 3. С. 3-32.
2. Bergen K. J., Johnson P. A., de Hoop M. V., Beroza G. C. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience // Science. 2004. Vol. 343, No. 6433. eaau0323.

МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОГО ДИЛАТИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА: ВЕРИФИКАЦИЯ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ*

И. А. Пантелеев

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Горные породы как осадочной толщи, так и кристаллического фундамента в естественных условиях залегания обнаруживают специфическое деформационное поведение. Специфичность поведения заключается в зависимости упругих свойств от вида напряженно-деформированного состояния, анизотропии упругих свойств, индуцированной ростом микротрещиноватости, накоплении необратимых деформаций (в том числе объемных), обусловленных ее развитием, уплотнении, связанном с деградацией порового пространства. Для описания указанных эффектов модели деформируемого твердого тела должны объединять в себе определяющие соотношения механики континуальной поврежденности с параметрами поврежденности различного ранга, механики разномодульных сред и сред, свойства которых зависят от вида напряженно-деформированного состояния, пороупругости и поропластичности. В общем случае трещиновато-пористого материала, типичным примером которого являются горные породы, все возможные сценарии его деформационного отклика определяются двумя конкурирующими механизмами: ростом микротрещиноватости и изменением геометрии порового пространства.

Настоящая работа посвящена разработке модели деформирования трещиноватых пористых хрупких сред, учитывающей описанные выше особенности деформационного поведения данного класса материалов, ее экспериментальной верификации и приложению к решению геофизических задач. При построении модели, следуя классической теории анизотропной поврежденности, вводится тензор поврежденности второго ранга. Главные направления этого тензора задают направления ортотропии материала, а главные значения определяют изменение эффективной площади поперечных сечений, перпендикулярных к каждой из осей ортотропии [1]. Для описания эффекта направленного уплотнения вводится тензор уплотнения, след

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-77-30008.

© Пантелеев И. А., 2025

которого отражает текущую пористость материала. Взаимодействие двух тензорных параметров позволяет описать различные сценарии неупругого деформирования трещиноватой пористой среды.

Разработанная модель в частных случаях редуцируется к модели нелинейной пороупругости со скалярной поврежденностью [2], неклассической модели нелинейной упругости [3], модели пороупругой среды Био и модели линейно-упругого тела. Идентификация и верификация модели проведена на экспериментальных данных по циклическому непропорциональному трехосному сжатию песчаника Darley Dale. Показано, что нелинейная пороупругая модель с тензорной поврежденностью и уплотнением позволяет удовлетворительно описать не только ветки нагружки в каждом цикле, но и ветви разгрузки.

Предложенная модель была использована для описания азимутальной зависимости амплитуды колебаний порового давления, вызванных прохождением телесейсмических волн, и наблюдаемой для скважин, расположенных в районе крупных разломных зон. Установлено, что наличие преимущественной ориентации трещиноватости в районе разломной зоны является причиной анизотропии пороупругих свойств среды, что, в свою очередь, приводит к зависимости деформационного отклика подземной водоносной системы от направления прихода телесейсмических волн.

Список литературы

1. Пантелеев И. А., Ляховский В. А. Ориентация трещиноватости в хрупком твердом теле при традиционном трехосном сжатии // Известия Российской Академии наук. Механика твердого тела. 2022. № 5. С. 70–92.
2. Hamiel Y., Lyakhovsky V., Agnon A. Rock dilation, nonlinear deformation, and pore pressure change under shear // Earth. Planet. Sci. Lett. 2005. Vol. 237. P. 577–589.
3. Lyakhovsky V., Ben-Zion Y., Agnon A. Distributed damage, faulting, and friction // Journal of Geophysical Research. 1997. Vol.102, No. B12. P. 27635–27649.

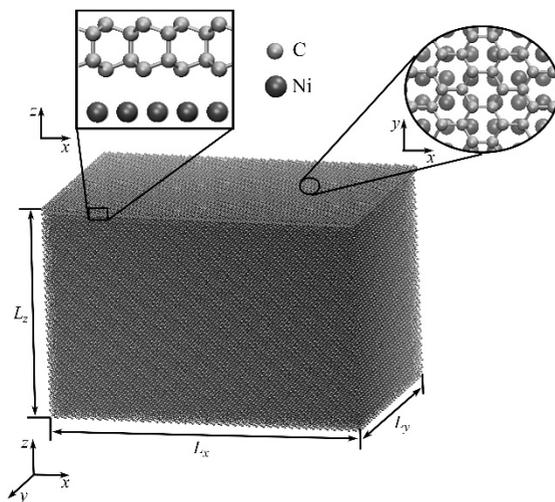
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА НИКЕЛЬ/ДИАМАН: МОЛЕКУЛЯРНАЯ ДИНАМИКА*

П. В. Полякова, Ю. А. Баимова

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа

В последние годы исследование новых композиционных материалов на основе металлов, армированных двумерными структурами, является актуальной задачей. Такие композиты могут эффективно использоваться в нанoeлектронике, нанооптике, в производстве легких и высокопрочных элементов конструкций для автомобилей, самолетов и космических аппаратов [1, 2]. В данной работе механические свойства нового композита никель/диаман исследованы методом молекулярной динамики.

На рисунке представлена начальная структура композита никель/диаман. Композит представляет собой монокристалл никеля размером $150 \times 100 \times 100 \text{ \AA}$, покрытый различным количеством диамантовых слоев.



Начальная структура композита никель/диаман. Атомы никеля показаны черным цветом, а атомы углерода — серым. На вставках показана увеличенная область поверхности в двух проекциях

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-72-10112-П).

© Полякова П. В., Баимова Ю. А., 2025

Количество атомов никеля составляет 142 912, а количество атомов в диамане (два графеновых слоя) — 11 200. В данной работе рассматриваются диаманты с количеством графеновых слоев от 2 до 8.

Одноосное растяжение прикладывается вдоль осей x и y , что соответствует направлению «кресло» и «зигзаг» диамана соответственно. Все расчеты проводятся с использованием программного пакета LAMMPS. Для описания межатомных взаимодействий применяются три потенциала: потенциал AIREBO для описания взаимодействия углерод-углерод [3], потенциал Морзе — углерод-никель [4] и потенциал EAM — никель-никель [5]. В системе поддерживается постоянство температуры 300 К с помощью термостата Носе — Хувера. Периодические граничные условия применяются во всех направлениях.

Показано, модуль Юнга и предел прочности композита Ni/диаман составляют 147 ГПа и 22 ГПа, соответственно, но они могут быть увеличены за счет увеличения количества диамановых слоев в композите. Обнаружено, что зарождение дислокаций происходит на границе раздела между никелем и диаманом. Для всех рассмотренных композитов разрушение происходит сначала в диамане, а затем разрушается никель. Предел прочности композита никель/диаман практически не зависит от направления растяжения.

Список литературы

1. Zhang M., Shan Y., Kong Q., Pang H. Applications of metal-organic framework-graphene composite materials in electrochemical energy storage // *FlatChem*. 2022. Vol. 32. P. 100332.
2. You X., Zhang Q., Yang J., Dong S. Review on 3D-printed graphene-reinforced composites for structural applications // *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.* 2023. Vol. 167. P. 107420.
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.
4. Galashev A. Y., Katin K. P., Maslov M. M. Morse parameters for the interaction of metals with graphene and silicene // *Phys. Lett. A*. 2019. Vol. 383. P. 252–258.
5. Mendeleev M. I., Kramer M. J., Hao S. G., Wang C. Z. Development of interatomic potentials appropriate for simulation of liquid and glass properties of NiZr₂ alloy // *Philos. Mag.* 2012. Vol. 92. P. 4454–4469.

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛ ПО НАНЕСЕННЫМ МАРКЕРАМ*

Я. Е. Попов, М. Ю. Хребтов, В. М. Дулин

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

Контроль качества поверхности материалов и изделий играет ключевую роль в современном производстве. В этой области отлично показали себя оптические методы диагностики, основанные на съемке объекта измерения цифровыми камерами. Такие методы обладают высокой точностью и позволяют получать панорамные данные о состоянии поверхности. Для подобных методов не требуется размещение дополнительного оборудования на исследуемых объектах. Использование скоростных камер позволяет получать данные в том числе разрешенные во времени, что является важным при анализе динамических процессов. Ключевым фактором, влияющим на точность проведенных измерений, является точность выполненной процедуры калибровки камер — определения внутренних параметров камер и их положения в пространстве относительно исследуемого объекта. Данная работа посвящена реализации программно-аппаратного комплекса для восстановления формы поверхности твердых тел, использующего метод самокалибровки.

В состав измерительной системы входят две скоростные камеры Evercam HR2000, обладающие разрешением матрицы 2560×1920 и максимальной скоростью регистрации 2000 кадров в секунду при максимальном разрешении. Для освещения объекта измерения используется два светодиодных источника ПОЛИС LS 2.1. Для синхронизации использованного оборудования используется синхронизирующий процессор ПОЛИС SP 10.0. Для повышения точности реконструкции на объект был нанесен контрастный рисунок.

При проведении измерений на первом этапе выполнялась регистрация калибровочной мишени на нескольких глубинах в пределах рабочей области. После проводилась регистрация объекта измерения в ходе испытаний.

* Исследование выполнено за счет мегагранта № 075-15-2024-620, https://megagrant.ru/labs/lab_rus_1082740/?ysclid=m7n6d74bnq62744707.

© Попов Я. Е., Хребтов М. Ю., Дулин В. М., 2025

В ходе обработки данных на первом этапе на основе снимков мишени, конфигурация которой известна, вычислялись параметры камер. После для каждой пары кадров с разных камер производился поиск соответствующих точек на поверхности объекта. Для этого на одном из кадров строилась регулярная сетка, а на втором кадре методом DIC находились точки, соответствующие узлам сетки с первого кадра. После процедура повторялась с использованием гомографических преобразований. Пример сетки на паре кадров приведен на рис. 1.

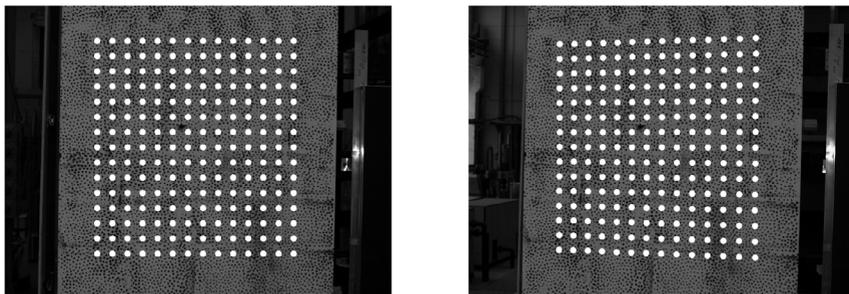


Рис. 1. Найденные пары точек на изображениях с разных камер

Далее проводилась оптимизация параметров калибровки камер путем минимизации ошибки совмещения точек для каждой пары на протяжении всей серии испытаний. После на основе уточненной калибровки методом триангуляции восстанавливалось положение точек в пространстве. Результат реконструкции приведен на рис. 2.

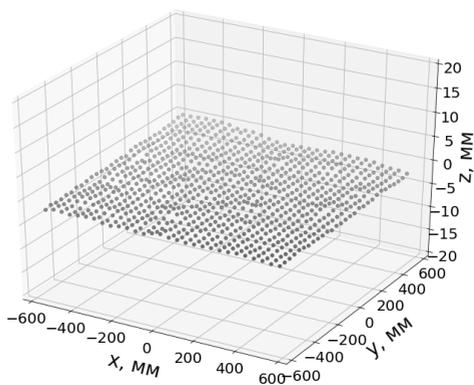


Рис. 2. Реконструированная поверхность

Запуск системы проводился в испытательной лаборатории строительных конструкций МГСУ. Результаты ускорения, вычисленные на основе показаний разработанной системы, сравнивались с показаниями закрепленных на объекте акселерометров.

ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ МАНИПУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТАМИ НА МИКРО- И НАНОУРОВНЕ

А. В. Прокунин, В. В. Коледов, А. В. Неженцев

*Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Москва*

Создание микро- и наноструктур осуществляется с использованием двух подходов [1]: *сверху вниз*, когда материал измельчается до мельчайшего размера, и *снизу вверх*, предполагающего сборку структур из отдельных элементов. Одним из методов *снизу вверх* является сборка путем манипулирования отдельными микро- и нанообъектами. Особое внимание привлекают микроэлектромеханические системы (МЭМС) на основе сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ), способные обеспечивать 3-мерное манипулирование объектами и его высокую точность [2].

В данной работе представлены новейшие результаты разработки систем управления устройствами с ЭПФ для манипулирования микро- и нанообъектами, а именно коаксиальная система нагрева и поворотный актюатор.

На основе сплавов с ЭПФ создано устройство для захвата микро- и нанообъектов — нанопинцет [2].

Для активации ЭПФ в нанопинците его нужно нагреть до температуры, необходимой для осуществления в материале структурного фазового перехода. Для нагрева используется коаксиальная игла, которая представляет собой вольфрамовую проволоку с диаметром 0,5 мм, заточенную методом электрохимического травления, с кончиком микронного радиуса. Вольфрамовая игла методом магнетронного напыления покрывается слоем диэлектрика, а затем слоем проводника. К проводящему слою проводящим клеем прикрепляется контакт. Затем кончик иглы срезается в электронном микроскопе с помощью сфокусированного ионного пучка. В сечении открывается доступ ко всем слоям коаксиальной структуры (рис. 1, а), (1) — вольфрам, (2) — диэлектрик, (3) — проводник. К месту среза присоединяется нанопинцет, таким образом, чтобы он контактировал с вольфрамом и проводящим слоем (рис. 1, б). Пропуская ток через

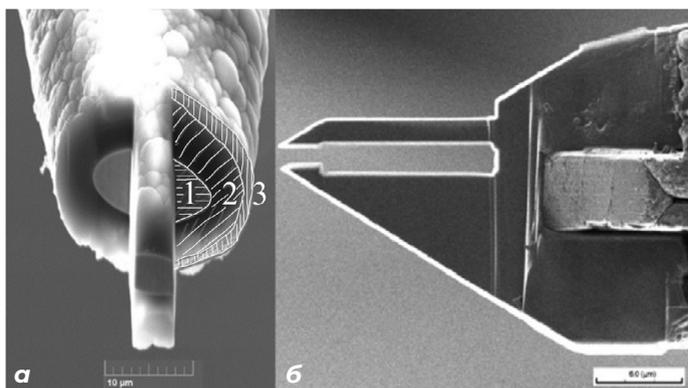


Рис. 1. Схема нанопинцета (а) и его фото в сканирующем электронном микроскопе (б)

получившуюся систему вследствие закона Джоуля — Ленца, нанопинцет нагревается и срабатывает.

Также ведется работа по созданию миниатюрного устройства для управления углом поворота нанопинцета (рис. 2). Поворотное устройство работает по принципу шарико-винтовой пары, т. е. благодаря преобразованию поступательного движения во вращение. Устройство состоит из сверла (2), «гайки» (4), спирали из сплава с ЭПФ (3) и корпуса (1).

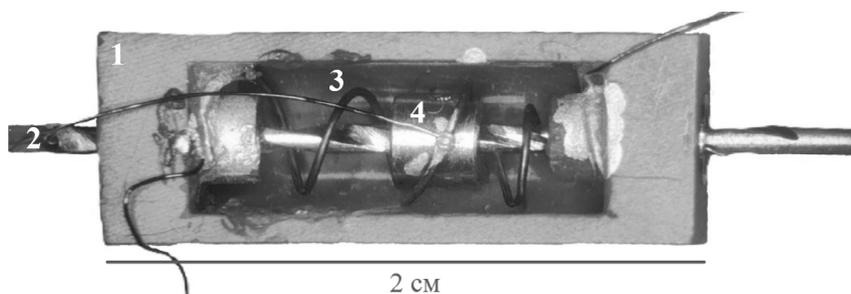


Рис. 2. Поворотная система

Нагревая тот или иной участок спирали, она стремится сжаться и тянет за собой «гайку», которая и поворачивает сверло, в которое вставляется коаксиальная система нагрева с нанопинцетом. Поворотная система обеспе-

чивает поворот нанопинцета на 90° по часовой стрелке и против часовой стрелки (суммарно на 180°).

Список литературы

1. Abid N., et al. Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: A review // *Advances in colloid and interface science*. 2021. Vol. 300. P. 102597.

2. Mazaev P. V., et al. Thermoelastic properties of micron-size actuators based on the Ti₂NiCu/Pt composite with shape-memory effect // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016. Vol. 61, No. 6. P. 630–638.

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ*

Е. А. Путилова, К. Д. Малыгина

*Институт машиноведения
им. Э.С. Горкунова УрО РАН, Екатеринбург*

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) представляют собой относительно новый класс материалов, состоящих из пяти или более компонентов. Их особенностью является равное или близкое к равномерному распределение атомов различных элементов в кристаллической решетке, что придает этим сплавам уникальные свойства. Разработанные составы, исследования микроструктуры и свойств ВЭСов уже на текущий момент позволяют обозначить их в качестве альтернативы классическим материалам, например, для аэрокосмической и энергетической отрасли [1, 2], для применений в условиях, требующих высокой стойкости к окружающей среде [3, 4]. Но как любой новый материал ВЭСы требуют акцентного внимания на особенностях изменения и формирования структуры, свойств, надежности и долговечности, а также стабильности при различных воздействиях и условиях эксплуатации. Однако, проанализировав материал, можно обозначить одну область знаний, которая является необходимой и обязательной в момент перехода к реальному производству и выпуску конкретной продукции и ее последующей безопасной эксплуатации, но при этом эта область знаний в текущий момент представляет собой «белое пятно» на карте исследований ВЭСов. Область возможностей применений неразрушающих методов диагностики для оценки как качества получаемой структуры и контроля свойств, так и оценки возможных изменений, происходящих в процессе термических и деформационных воздействий.

В данной работе представлены результаты, связанные с перспективами развития методов неразрушающей диагностики ВЭСов, однофазного и двухфазного составов, а также анализом состояния исследований для ВЭСов системы CoCrFeNiAl_x . В этих материалах, варьируя параметр x ,

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00345.

© Путилова Е. А., Малыгина К. Д., 2025

можно получить сплавы с различным соотношением ОЦК и ГЦК фаз [5, 6], что в значительной мере влияет на структуру и уровень свойства конечного материала.

Как известно, структура материала всегда определяет его свойства. Так при различном содержании алюминия в вышеупомянутом составе ВЭСов удается получить различное соотношение структурных и фазовых составляющих, что в свою очередь отражается на уровне магнитных характеристик. Увеличение количества ферромагнитной ОЦК фазы приводит к росту значения намагниченности насыщения, а изменение дисперсности структурных составляющих напрямую связано с коэрцитивной силой и вызывает рост ее значений.

В итоге планируется получить новую информацию о корреляции структурных параметров (дисперсности, плотности дефектов структуры, структурной анизотропии), уровня остаточных напряжений и механических характеристик высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeNiAl_x , подвергнутых различным термическим и механическим обработкам с уровнем магнитных структуро- и фазочувствительных параметров.

Список литературы

1. Stepanov N. D., Shaysultanov D. G., Salishchev G. A., Tikhonovsky M. A. Structure and mechanical properties of a light-weight AlNbTiV high entropy alloy // *Materials Letters*. 2014. Vol. 142. P. 153–155.
2. Zhang Y. *High-Entropy Materials. A brief introduction*. Singapore: Springer Nature, 2019.
3. Stepanov N. D., Shaysultanov D. G., Yurchenko N. Yu., Zhrebtsov S. V., Ladygin A. N., Salishchev G. A., Tikhonovsky M. Yu. High temperature deformation behavior and dynamic recrystallization in CoCrFeNiMn high entropy alloy // *Materials Science and Engineering A*. 2015. Vol. 636. P. 188–195.
4. Berndt N., Frint P., Bohme M., Muller S., Wagner M. F.-X. On radial microstructural variations, local texture and mechanical gradients after cold extrusion of commercially pure aluminum // *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 850, 143496.
5. Иванов И. В., Эмурлаев К. И., Руктуев А. А., Тюрин А. Г., Батаев И. А. Структура высокоэнтропийного сплава AlCoCrFeNi после деформации по схеме одноосного сжатия и термической обработки // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64, № 10. С. 736–746.
6. Иванов И. В., Аккузин С. А., Сафарова Д. Э., Литовченко И. Ю., Батаев И. А. Эволюция дислокационной структуры и фазового состава в процессе нагрева деформированного высокоэнтропийного сплава $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2024. Т. 67, № 2. С. 176–184.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ КОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ SPH

Г.Д. Рублев

*Всероссийский научно-исследовательский
институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва*

Метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH) с решением задачи Римана на контакте частиц [1] широко используется для моделирования вязких и упруго-пластических сред с разрывами. Разработана консервативная схема осесимметричного контактного метода SPH, позволяющая проводить моделирование пробития преград, лазерного воздействия, ударноволновых задач и других. При этом за счет использования осесимметричного метода становится возможным добиться высокой точности пространственной дискретизации при малом количестве частиц по сравнению с трехмерным решателем.

Для повышения точности моделирования для разработанного осесимметричного метода применена кусочно-линейная реконструкция значений на контакте типа MUSCL и корректировка градиента сглаживающего ядра [2].

В разработанную схему включена модель поверхностного натяжения, реализованная с использованием фиктивных частиц, с которыми взаимодействуют фиктивные частицы. Фиктивным частицам приписывается давление равное давлению Лапласа, для чего предварительно вычисляется кривизна поверхности.

В работе приводятся примеры моделирования, демонстрирующие возможности разработанного метода.

Список литературы

1. Parshikov A. N., Medin S. A. Smoothed Particle Hydrodynamics Using Interparticle Contact Algorithms // J. Comp. Phys. 2002. V. 180. P. 358.
2. Rublev G. D., Parshikov A. N., Dyachkov S. A. Improving approximation accuracy in Godunov-type smoothed particle hydrodynamics methods // Applied Mathematics and Computation. 2024. Vol. 488.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТО-ГРП С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ

А. Е. Саввинов^{1,2}, А. Н. Сибин^{1,2}, Р. Ф. Абдуллин^{1,2},
А. Н. Байкин^{1,2}, С. В. Головин^{1,2}, С. А. Калинин³, Р. Р. Копейкин³

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск

²Институт гидродинамики

им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

³Группа компаний «Газпром нефть», Санкт-Петербург

Запасы легко извлекаемых нефти и газа в мире истощаются, поэтому существует тенденция к ухудшению фильтрационно-емкостных свойств разрабатываемых месторождений. Для разработки таких месторождений используется технология поддержания пластового давления. В нагнетательные скважины закачивается жидкость, вытесняющая нефть, в добывающих скважинах вытесненная нефть и газ, соответственно, добываются. В процессе нагнетания давление в нагнетательной скважине может превышать критическое давление инициации гидравлического разрыва пласта (ГРП). При котором возникает и самопроизвольно распространяется трещина ГРП, изменяющая картину вытеснения в пласте, такой негативный эффект называется авто-ГРП. Моделирование авто-ГРП является актуальной задачей при проектировании систем поддержания пластового давления и эксплуатации нагнетательных скважин. В частности, на практике, часто происходит прорыв и распространение трещин авто-ГРП сразу в нескольких пластах. Для этого требуется моделировать распространение трещины авто-ГРП в трехмерной слоистой среде.

Данная работа посвящена разработке прикладной математической модели авто-ГРП в трехмерной пороупругой слоистой среде с разделением по физическим процессам в пласте и трещине для учета одновременного развития трещины в длину и высоту. В настоящей работе предлагается усовершенствовать численный алгоритм с помощью разделения общей комплексной, связанной задачи на подмодели физических процессов. Предложена модифицированная математическая модель развития трещины авто-ГРП в трехмерной пороупругой среде. Модификация заключается

в разделении на подмодели в трещине и пласте. Математическая подмодель в пласте разделяется на подзадачи упругости и фильтрации [1], а также учитывает развития трещины в длину и высоту. Разработан, конечно, объемный численный алгоритм решения трехмерной задачи развития трещины авто-ГРП. Для дискретизации подмодели в трещине используется метод разрывных смещений [2]. Также используются метод наименьших квадратов для интерполяции градиентов и значений функций на гранях неортогональной сетки и метод Ньютона — Рафсона для линеаризации напряжений сцепления. Предложена оптимизация алгоритма, в основе которой разделение матрицы численной подмодели в трещине на разреженную и плотную матрицу оставшихся элементов [3] и затем модификация итеративного процесса по нелинейности.

Модель позволяет корректный учет повышения давления при закачке жидкости в продуктивных пластах и пропластках, окруженных покрышками, а также последующий возможный прорыв в соседние слои.

Список литературы

1. Kim J. Unconditionally stable sequential schemes for all-way coupled thermoporoelasticity: Undrained-adiabatic and extended fixed-stress splits // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2018. Т. 341. С. 93–112. DOI: doi.org/10.1016/j.cma.2018.06.030. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782517302542>.
2. Crouch S. L., Starfield A. M., Rizzo F. *Boundary element methods in solid mechanics*. 1983. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:129858826>.
3. Peirce A. P. Localized Jacobian ILU preconditioners for hydraulic fractures // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006. Vol. 65, No. 12. P. 1935–1946. DOI: 10.1002/nme.1528.
4. Baykin A., et al. Two-dimensional models for waterflooding induced hydraulic fracture accounting for the poroelastic effects on a reservoir scale // *Geoenery Science and Engineering*. 2023. Т. 224. С. 211600. DOI: doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211600. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949891023001872>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В ПУЗЫРЬКЕ ГЕЛИЯ В ЖИДКОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ *

Р. А. Савенко^{1,2}, Д. И. Карпов^{1,2},
А. В. Ридель¹, С. М. Коробейников¹

¹ Новосибирский государственный
технический университет, Новосибирск

² Институт гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Известно, что современное высоковольтное оборудование, использующее жидкие диэлектрики в качестве электрической изоляции, часто выходит из строя при значениях напряжения значительно меньше напряжения пробоя диэлектрика. Одна из возможных причин — наличие газовых включений в жидком диэлектрике. Недавно было обнаружено явление формирования стримеров с поверхности свободно плавающего газового пузырька в трансформаторном масле после частичного разряда в пузырьке во внешнем электрическом поле. Развитие стримеров приводило к пробое межэлектродного промежутка [1]. Понимания механизмов этого явления нет. Настоящая работа направлена на выяснение условий возникновения стримеров в жидком диэлектрике с поверхности пузырька после частичного разряда в пузырьке.

Стримеры в жидкости возникают при достижении локальной напряженности электрического поля значений выше 5 МВ/см, что выше возникающих в оборудовании. Частичные разряды в газовом пузырьке приводят к разделению зарядов в пузырьке, что приводит к повышению напряженности на поверхности пузырька. Однако при увеличении напряженности на поверхности пузырька величина локальной напряженности не достигает необходимых значений для развития стримеров (на один порядок меньше). На данный момент нет методов для экспериментального измерения локальной напряженности электрического поля на границе пузырька, поэтому было решено провести численное моделирование развития частичного разряда в пузырьке гелия. Было проведено трехмерное моделирование частичного разряда в сферическом пузырьке в гидродинамическом приближении

* Работа поддержана РФФ (грант № 22-79-10198).

© Савенко Р. А., Карпов Д. И., Ридель А. В., Коробейников С. М., 2025

с использованием экспериментальных данных по коэффициентам диффузии электронов и положительных ионов, их коэффициентам подвижности, коэффициенту ударной ионизации электронами и коэффициенту трехчастичной рекомбинации [2–4].

Выполнен расчет начальной стадии частичного разряда, а именно первые 3 нс с момента появления затравочного электрона. По результатам моделирования построено распределение электронов по поверхности пузырька, рассмотрена зависимость формы распределения от размера области начальной затравки, рассчитано усиление напряженности на поверхности пузырька, которое составило не более 2 раз по сравнению с изначальной величиной поля на границе пузырька. Также были вычислены характерные величины концентраций зарядов, их зависимость от времени моделирования. Исследована роль коэффициентов ионизации и рекомбинации: ионизация определяет время достижения максимальных значений концентрации в расчетах, рекомбинация ограничивает максимальные значения концентраций. Замечено, что в начальные моменты развития частичного разряда наблюдается резкий рост концентраций положительных ионов и электронов до значений 10^{16} – 10^{17} м⁻³ и формируется фронт ионизации, движущийся к границе пузырька. Затем рост концентраций замедляется и плавно приближается к значениям 10^{19} – 10^{20} м⁻³ при достижении волной электронов границы пузырька. При достижении концентрациями зарядов значений 10^{17} м⁻³ наблюдалось существенное искажение электрического поля внутри пузырька с формированием области экранирования, что указывает на формирование слабоионизованной плазмы в этой области. Характерное время достижения границы электронами составляет 0,3–0,5 нс в зависимости от положения затравки, формирование волны ионизации наблюдается на расстоянии 0,6 мм от положения затравки. Скорость волны ионизации при этом составляет величину порядка 1000 км/с. Характерное время достижения границы положительными ионами составляет около 2,4 нс.

Список литературы

1. Korobeynikov, S.M., Ridell, A.V., Ovsyannikov, A.G. et al. Streamers in transformer oil initiated by partial discharge in a bubble at low AC electric fields. *Electr Eng* (2024)
2. Смирнов Б. М. Свойства газоразрядной плазмы. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 363 с.
3. Davies D. K., Jones F. L., Morgan C. G. Primary ionization coefficient of helium. *Proc. Phys. Soc.* 1962. Vol. 80. P. 898–908.
4. Ran J., Luo H., Yue Y., Wang X. Measurement of the first Townsend's ionization coefficients in helium, air, and nitrogen at atmospheric pressure. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2014. Vol. 83. P. 074503.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ БЛАЗИУСА*

И. А. Садовский

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

Одним из эффективных методов воздействия на ламинарно-турбулентный (Л-Т) переход является распределенное воздействие на пограничный слой (ПС) (отрицательный массоперенос на поверхности). За счет задержки возникновения турбулентности снижается сопротивление трения, что предлагает многообещающий подход к повышению стабильности потока. В работе [1] было показано, что эффективность распределенного воздействия через поперечную щель в плане подавления возмущений зависит от стадии развития возмущения, на которой производится воздействие, а не от начальной интенсивности возмущения. В работе продемонстрировано сильное влияние на линейной и слабонелинейной стадии развития волн Толлмина — Шлихтинга (Т-Ш). Определенный эффект был достигнут и на нелинейных стадиях развития возмущений: отрицательный массоперенос приводит к полному подавлению субгармоник нарастающих колебаний в ПС плоской пластины [2].

Настоящая работа является развитием работы [1]. Исследуется влияние распределенного воздействия через гидродинамически гладкую поверхность на собственные возмущения ПС плоской пластины — волны Т-Ш, нарастающие вниз по потоку и приводящие к Л-Т-переходу. Исследование носит фундаментальный характер, его основная задача — получить экспериментальные данные по изменению профиля скорости за счет распределенного воздействия на ПС и, его влияния на устойчивость волны Т-Ш.

Эксперимент проводился в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН. Скорость набегающего потока была равна $U_\infty = 9$ м/с, число Рейнольдса, рассчитанное по толщине вытеснения в начале перфорации

* Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2024-2026 гг. (номер гос. регистрации 124021400038-1).

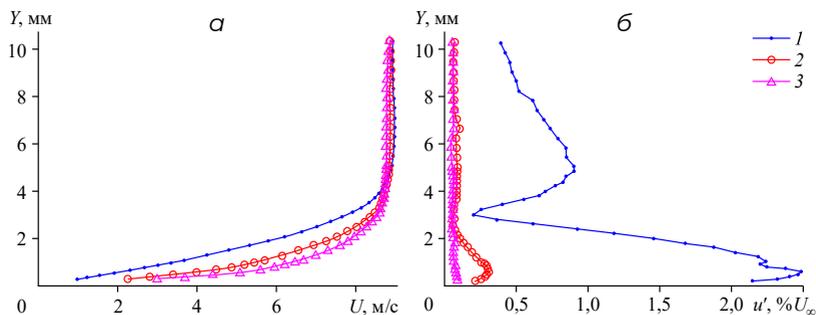
© Садовский И. А., 2025

рованной области, составляло $Re_{\delta_1} = 888$. В качестве модели рассматривалась плоская пластина из оргстекла $1,5 \times 1 \times 0,010$ м, которая устанавливалась вертикально в рабочей части.

Интенсивность воздействия характеризуется коэффициентом $C_s = \frac{\rho_s U_s}{\rho_\infty U_\infty}$,

в который входят ρ_s — плотность газа в струе, ρ_∞ — плотность газа в потоке, U_s — средняя скорость газа над поверхностью, U_∞ — скорость набегающего потока. Интенсивность воздействия составляла $C_s = 0,016$ и $0,027$.

Профили пульсаций скорости выявили наличие собственных возмущений ПС в виде волн Т-Ш, которые имели два максимума: один — вблизи стенки, другой — в области внешней границы ПС (см. кривую 1 на рисунке, б). Спектральный анализ возмущений показал, что основная частота возмущения составляет $f = 100$ Гц. Распределенное воздействие существенно влияет на течение. Толщина ПС уменьшается, а уровень пульсаций возмущений снижается. В зоне распределенного воздействия на поток и сразу за ней профили скорости становятся более наполненными (см. кривые 2, 3 на рисунке, а). Толщина вытеснения для координаты $X = 585$ мм при этом уменьшается с $\delta^* = 1,55$ мм (без воздействия) до $\delta^* = 0,99$ и $0,82$ мм при $C_s = 0,016$ и $0,027$ соответственно.



Профили средней скорости (а) и пульсации скорости (б), $X = 585$ мм:
 1 — без воздействия; 2 — при воздействии интенсивностью $C_s = 0,016$;
 3 — при воздействии интенсивностью $C_s = 0,027$

Распределенное воздействие эффективно подавляет рост волны Т-Ш, снижая ее амплитуду в 79 раз в конце области измерений, и устраняя кратные основной частоте возмущения гармоники.

Список литературы

1. Козлов В. В., Левченко В. Я., Щербаков В. А. Развитие возмущений в пограничном слое при щелевом отсасывании // Учен. зап. ЦАГИ. 1978. Т. 9, № 2. С. 99–105.

2. Forest A. E. Engineering predictions of transitional boundary-layers // AGARD-CP-224. 1977. P. 22-1-22-19.

АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ В ЗАДАЧАХ ВНЕШНЕГО ОБТЕКАНИЯ*

Н. С. Смирнова

*Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» РАН, Москва*

В задачах внешнего обтекания тел со сложной геометрией, решение которых может содержать различные конфигурации разрывов, важную роль играет построение качественной расчетной сетки. Современные алгоритмы адаптации расчетной сетки позволяют получать высокоточные результаты с меньшими вычислительными затратами [1–4]. В настоящее время активно развиваются методы адаптации, использующие силовые физические аналогии [5–7]. В таких методах элементы сетки рассматриваются как упругие деформируемые объекты, наделенные механическими связями. Расчетная сетка моделируется как механическая система, где узлы связаны между собой, а жесткость связей определяется свойствами поля. Это позволяет эффективно решать задачу адаптации, обеспечивая корректность решения при надлежащем выборе коэффициента жесткости. В силу физической аналогии такой подход обладает универсальностью и может быть применен к сеткам произвольной размерности и топологии.

Данная работа посвящена разработке алгоритма адаптации расчетной сетки как механической системы к полю течения, содержащему головной скачок уплотнения. Предложенный алгоритм адаптации расчетной сетки применялся как к аналитически заданным полям, так и к дискретным полям. В работе рассматривались стационарные задачи внешнего обтекания цилиндра и эллипса совершенным газом. Поле течения рассчитывалось с помощью численного решения трехмерных уравнений Навье — Стокса неявным методом второго порядка точности. Предложенная модель и алгоритм адаптации, а также его программная реализация показывают рабо-

* Расчеты проводились с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления и большие данные» (ЦКП «Информатика») ФИЦ ИУ РАН.

© Смирнова Н. С., 2025

тоспособность и правильное выделение областей высокого градиента поля течения [8].

Список литературы

1. Thompson J. F., Warsi Z. U. A., Mastin C. W. Numerical grid generation: foundations and applications. Elsevier North-Holland, Inc., 1985.
2. Азаренок Б. Н. Вариационные методы построения структурированных сеток и их приложения к газовой динамике: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2009. 265 с.
3. Афендииков А. Л., Меньшов И. С., Меркулов К. Д., Павлухин П. В. Метод адаптивных декартовых сеток для решения задач газовой динамики // Российская академия наук. 2017. С. 63.
4. Стручков А. В., Козелков А. С., Жучков Р. Н., Уткина А. А., Саразов А. В. Численное моделирование задач аэродинамики со статической адаптацией сетки под особенности решения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2019. № 2. С. 55–67.
5. Garanzha V. A. Variational principles in grid generation and geometric modelling: theoretical justifications and open problems // Numerical Linear Algebra with Applications. 2004. Vol. 11, No. 5–6. P. 535–563.
6. Sheshadri A., Crabill. J. A. Mesh deformation and shock capturing techniques for high-order simulation of unsteady compressible flows on dynamic meshes // 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2015. P. 1741.
7. Вершков В. А. Математическое моделирование процесса обтекания шарнирного несущего винта вертолета методом деформируемых неструктурированных сеток: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2021. 116 с.
8. Voronich I. V., Smirnova N. S., Titarev V. A. Algorithm for Mesh Adaptation to a Flow Field with a Bow Shock Wave // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2024. Vol. 64, No. 9. P. 2111–2120.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ДИНАМИКУ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ ДЛЯ КРУГЛОГО И ПРЯМОУГОЛЬНОГО СОПЕЛ*

М. И. Сорокин, А. А. Некрасова, М. П. Токарев

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

Свободные струи являются предметом многих теоретических и экспериментальных исследований [1, 2]. Такие исследования позволяют понять механику массопереноса струйных течений для их применения в химических реакторах, газотурбинных и ракетных двигателях [3]. Такое применение зачастую сопровождается процессом горения компонент смеси на выходе струи, одним из важных факторов которого является перемешивание струи с окружающей средой. Интенсифицировать процесс перемешивания можно путем принудительного разрушения крупномасштабных вихревых структур, для этого можно использовать методы пассивного и активного управления. Наиболее распространенным и легко реализуемым способом улучшения перемешивания является изменение геометрии выходного сечения сопла. Так, на практике уже применяются плоские, прямоугольные и шевронные сопла. В свою очередь методы активного управления являются более перспективными в связи с быстрым развитием программно-аппаратного обеспечения [4].

Исследования проводились для круглого и прямоугольного сопел с щелевыми распределителями на кромке сопла (рис. 1). Были проведены серии

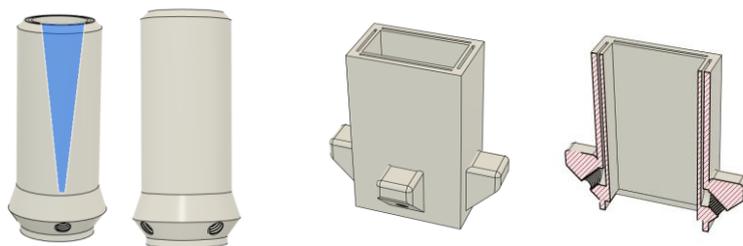


Рис. 1. 3D-модели сопел с щелевыми распределителями

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-30075, <https://rscf.ru/project/19-79-30075/>

© Сорокин М. И., Некрасова А. А., Токарев М. П., 2025

PIV экспериментов с высоким пространственным разрешением (45 пикселей/мм с размером изображения 16 Мп) и скоростной визуализации (рис. 2) для числа Рейнольдса основной струи $Re = 5000$. Частота вдува соответствовала числам Струхала $St = 0,5$ и $St = 1$.

В результате проведенных исследований были получены поля средней скорости, поля вторых моментов скорости и POD-разложения (англ. *proper orthogonal decomposition*) для различных режимов периодического воздействия струями на кромке сопла. Показано, что использование представленных методов управления приводит к более быстрому распаду ядра струи, а уменьшение длительности подачи струи при одних и тех же частотах и расходе приводит к усилению данного эффекта.

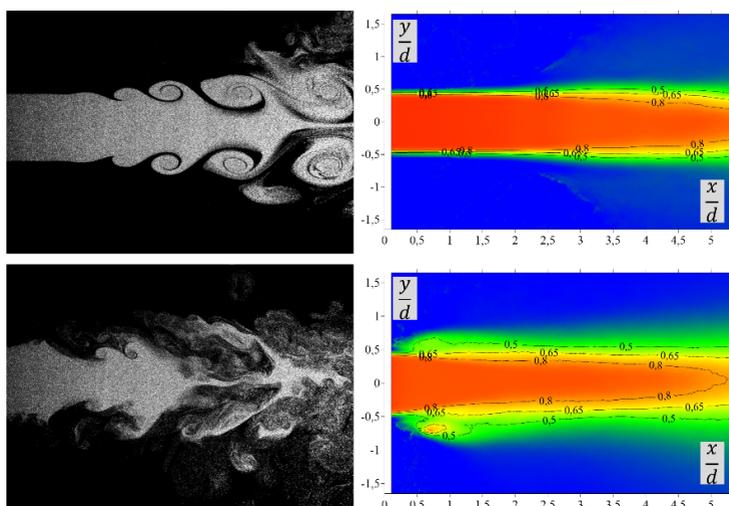


Рис. 2. Визуализация и поле средней скорости осесимметричной струи без управления (*сверху*) и с кольцевым вдувом (*снизу*)

Список литературы

1. Quinn W.R. Development of a large-aspect-ratio rectangular turbulent free jet // AIAA journal. 1994. Vol. 32, No. 3. P. 547–554.
2. Quinn W.R. Turbulent mixing in a free jet issuing from a low aspect ratio contoured rectangular nozzle // The Aeronautical Journal. 1995. Vol. 99, No. 988. P. 337–342.
3. Knowles K., Saddington A.J. A review of jet mixing enhancement for aircraft propulsion applications // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2006. Vol. 220, No. 2. P. 103–127.
4. Wu Z. et al. Jet mixing optimization using machine learning control // Experiments in Fluids. 2018. Vol. 59. P. 1–17.

КВАЗИДВУМЕРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ПЕНЫ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ-ШОУ ПРИ НАЛИЧИИ ДЛИННОГО ПРЕПЯТСТВИЯ

А. А. Спицына, Н. Д. Шмакова

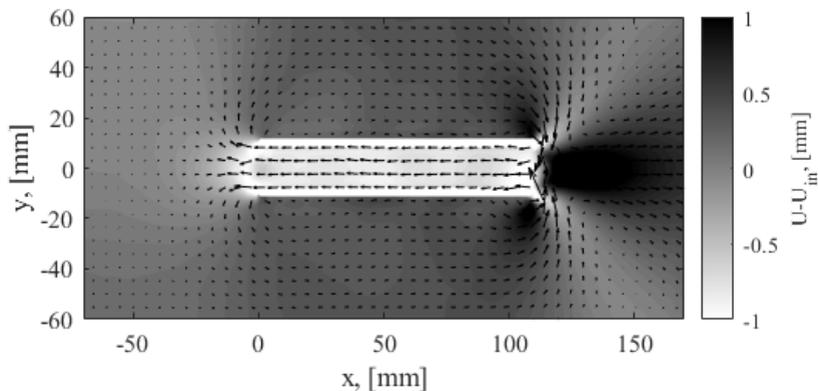
*Институт гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

Жидкие пены встречаются как в повседневной жизни и отраслях промышленности (например, продукты и технологии в пищевой, косметической и фармацевтической промышленности добыча руды, рекультивация почвы и нефтедобыча), так и в природе (морская пена, вспененная защитная оболочка некоторых личинок насекомых). Такое повсеместное применение связано с простотой создания пены — барбатиrowание жидкости газом. Гетерогенная структура пены приводит к сложному реологическому поведению. В зависимости от типа и параметров внешних воздействий могут одновременно проявляться упругие, пластические и вязкие свойства пены [1, 2].

Реология — это наука, которая занимается количественной оценкой реакции материалов на механические воздействия. Однако стандартные реометры могут измерять только общие макроскопические параметры, такие как модули вязкоупругости. Они не способны уловить гетерогенный поток мягких аморфных материалов на мезоскопическом уровне, который возникает в результате перестройки микроструктурных элементов. Этот аспект крайне важен для построения точных моделей. Ряд экспериментальных исследований был направлен на изучение реологии пены при обтекании препятствия в квазидвумерной постановке [3, 4]. Показано, что с высотой препятствия, либо с уменьшением эффективной жидкой фракции, увеличивается скорость за препятствием (эффект отрицательного следа).

В данной работе исследуется квазидвумерное течение пены в ячейке Хеле-Шоу при наличии «каналов»: пространства между двумя параллельными вытянутыми препятствиями из силиконового шнура диаметром 2 мм. Ячейка представляет из себя две стеклянные пластины, разделенные миллиметровым зазором. С одного края к ячейке прикреплен резервуар, заполненный мыльным раствором. В резервуар через иголку диаметром 0,6 мм подается воздух с постоянным расходом 1 мл/с. Таким образом, средняя

скорость потока и площадь ячеек пены постоянны. В экспериментах варьируются длина и ширина «канала».



Продольная компонента (градиация серого) и векторное поле (стрелки) скорости потока пены в ячейке Хеле-Шоу при наличии двух параллельных вытянутых препятствий на расстоянии 2 см

На рисунке показана продольная компонента скорости за вычетом средней скорости потока при прохождении потоком пены канала шириной 2 см (белые полосы на изображении). Качественно картина течения схожа с течением сквозь проницаемое препятствие: наблюдается замедление потока в «канале» и ускорение (эффект отрицательного следа) после прохождения канала. Наблюдается зависимость скорости от длины и ширины канала: чем уже канал, тем меньше скорость потока и тем более выражен эффект отрицательного следа.

Список литературы

1. Weaire D. The Physics of Foams. Oxford University Press, 1999
2. Hohler R. & Cohen-Addad S. Rheology of liquid foams // J. Phys. Condens. Matter 2005. Vol. 17. R1041–R1069.
3. Shmakova N.D., Chevalier T., Puisto A., Alava M., Raufast, C., Santucci S. Quasi-two-dimensional foam flow through and around a permeable obstacle // Phys. Rev. Fluids. 2020. Vol. 5. P. 93301.
4. Stennikova O., Shmakova N., Carrat J.-B., Ermanyuk E. Liquid Fraction Effect on Foam Flow through a Local Obstacle // Polymers. 2022. Vol. 14. P. 5307.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ*

В. М. Темербеков, Д. А. Тропин

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

На сегодняшний день одним из наиболее актуальных направлений в исследованиях является поиск высокоэффективных источников энергии, при использовании которых негативное воздействие на окружающую среду будет сведено к минимуму. Водород удовлетворяет этим требованиям и является одним из самых перспективных источников энергии в мире [1–2]. Однако использование этого газа и его соединений обуславливает необходимость решения вопросов связанных с взрыво- и пожаробезопасностью. Одним из направлений в данной области является поиск способов срыва газовой детонации при помощи различных преград. Целью настоящей работы является исследование влияния геометрических параметров жесткой проницаемой преграды на ослабление детонации.

Для численного исследования поставленной задачи в плоском прямоугольном канале моделировалась система, состоящая из наборов тонких конечноразмерных пластин, ориентированных по потоку либо поперек потока. Вся расчетная область заполнялась предварительно перемешанной стехиометрической неподвижной смесью водорода с воздухом при начальном давлении $p = 100$ кПа и температуре $T = 300$ К. Геометрические параметры пластин и расстояние между ними варьировались. Геометрические параметры канала не изменялись. Перед препятствиями посредством интерполяции задавалась предварительно рассчитанная ячеистая детонационная волна. Скорость фронта ДВ составляет $D_{ср} = 1937$ м/с. При таких начальных условиях поперечный размер детонационной ячейки составляет $\lambda = 12,5$ мм. Задача решалась в расчетном пакете ANSYS Fluent. Подробное описание используемого подхода, а также результаты валидации представлены в работах [3–4].

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (№ гос. регистрации: 124021400037-4).

© Темербеков В. М., Тропин Д. А., 2025

Для пластин, ориентированных вдоль потока, показано, что уменьшение расстояния между пластинами по вертикали приводит к уменьшению скорости распространения детонации. Уменьшение расстояния между пластинами по горизонтали при прочих равных условиях позволяет увеличить частоту взаимодействия лидирующего фронта с пластинами, что, в свою очередь, способствует снижению скорости распространения детонации. При этом можно добиться срыва детонации без дальнейшего реинициирования при уменьшении зазора между пластин по вертикали менее $0,3\lambda$.

Изменение ориентации пластин с ориентации по потоку на ориентацию поперек потока приводит к уменьшению скорости распространения детонации при неизменных остальных геометрических параметрах системы пластин ввиду возрастания коэффициента блокировки канала. Также определено, что для пластин, ориентированных поперек потока, уменьшение их длины и расстояния между ними приводит к увеличению скорости распространения лидирующей ударной волны, в то время как для пластин, ориентированных вдоль потока, наблюдается обратная тенденция. Показано, что существует критическая частота взаимодействия детонационной волны с пластинами, ориентированными поперек потока, приводящая к срыву детонации.

Оценено влияние геометрических параметров пластин и шага их установки на степень ослабления детонации. Определено, что увеличение количества пластин приводит к более интенсивному ослаблению детонации по сравнению с увеличением их удельного объема. Также увеличение удельного объема, занимаемого пластинами, и их количества в одном ряду приводит к более существенному влиянию количества рядов пластин на ослабление детонации. Определено, что изменение коэффициента блокировки канала оказывает более существенное влияние на распространение детонации по сравнению с изменением количества рядов пластин и их удельного объема.

Список литературы

1. Paparao J., Murugan S. Oxy-hydrogen gas as an alternative fuel for heat and power generation applications — A review // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, No. 76. P. 37705–37735.
2. Tañç B., Hüseyin T. A., Ertuğrul B., Kadir A. Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol 44, No. 20. P. 10120–10128.
3. Bedarev I. A., Temerbekov V. M. Estimation of the energy of detonation initiation in a hydrogen-oxygen mixture by a high velocity projectile // *Thermal Science*. 2021. Vol. 25, No. 5. P. 3889–3897.
4. Bedarev I. A., Syrovaten A. A., Temerbekov V. M. Numerical Simulation of Oblique Detonation Initiation by a High-Velocity Projectile Flying in a Hydrogen-Air Mixture // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2024. Vol. 60, No. 1. P. 15–24.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ОДНОВРЕМЕННОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

А. Д. Тимофеева

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский*

В настоящее время в качестве основных исполнительных механизмов силовой системы управления полетом используются электрогидравлические сервоприводы (ЭГСП), ввиду их высокой надежности и хороших массогабаритных характеристик [1]. Для удовлетворения требованиям безопасности полетов [2] на основных управляющих поверхностях используется система рулевых приводов, состоящие из нескольких ЭГСП, соединенных по схеме «суммирования усилий». Актуальными задачами использования такой схемы является прогнозирование и оценка влияния возникающего взаимонагружения (обусловленного технологическим разбросом параметров приводов) на работу системы в режимах малых и больших управляющих сигналов, а также проектирование системы контроля для системы рулевых приводов с внедренным алгоритмом снижения взаимонагружения. Решение этих вопросов позволит более обоснованно выставлять требования к системе приводов, что приведет в итоге к повышению безопасности полетов.

Алгоритмы снижения взаимонагружения подразумевают включение обратной связи по перепаду давлений привода, перемещению поршня или положению золотника с ПИ/Д-регулятором и ограничениями величины коррекции для сохранения качества управления [3]. Исследование внедрения таких алгоритмов на типовых режимах работы привода (управляющие сигналы 2–6 % от максимального хода штока и внешние нагрузки до 10 % от максимальной располагаемой силы привода) проведено в работах [4]. Показано, что алгоритмы для системы двух ЭГСП снижают взаимонагружение до 10 % максимального развиваемого усилия одного привода.

При малых управляющих сигналах (до 1 % от максимального хода) характеристики привода носят нелинейный характер, что приводит к уменьшению запасов устойчивости и образованию циклических перемещений рулевой поверхности (как устойчивых, так и неустойчивых) [5]. Возникновение взаимонагружения на этих режимах может приводить к большим амплиту-

дам этих циклов, а алгоритм необходимо проектировать так, чтобы не вошло дополнительное фазовое запаздывание в систему.

При больших управляющих сигналах (60–80 % от максимального хода, что в общем случае так же означает большие внешние нагрузки) при уменьшении развиваемой скорости (в результате действия алгоритмов снижения взаимонагружения) возможен выход за границу устойчивости (при неустойчивой аэродинамической компоновке) или значительное ухудшение переходного процесса (для устойчивой компоновки) [6], что требует проведения дополнительных исследований.

Отдельной задачей является проектирование системы контроля такой системы. Наибольшую актуальность эта проблема приобретает при отказе одного из приводов при парировании больших внешних нагрузок. В этом случае алгоритм будет «подтягивать» функционирующий привод к отказавшему, и, таким образом, будет потеряна секция рулевой поверхности на время перестраивания алгоритма. Соответственно, система контроля должна безударно и с достаточным быстродействием перестраивать алгоритм при отказах.

Суммируя сказанное, при внедрении алгоритмов снижения взаимонагружения в систему рулевых приводов возникает проблема корректной настройки алгоритмов для разных режимов работы привода — на типовых режимах, при малых и больших управляющих сигналах, а также проектирования системы контроля. Целесообразно так же выработать подход к выставлению требований по соответствию частотных характеристик рулевой подсистемы, а не отдельных рулевых приводов, с учетом влияния взаимонагружения.

Список литературы

1. Редько П.Г., Ермаков С.А., Селиванов А.М. и др. Концепция развития систем рулевых приводов современных самолетов // Полет. 2008. № 1. С. 50–60.
2. Авиационные правила 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. М.: МАК, 2022. 357 с.
3. Алексеенков А. С., Ерофеев Е. В., Найденов А. В. Исследование силового взаимонагружения разнородных электрогидравлических рулевых приводов при их совместной работе // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 9. С. 26–30.
4. Алексеенков А. С., Ерофеев Е. В., Стеблин А. И., Тимофеева А. Д. Исследование алгоритма снижения взаимонагружения двух приводов, одновременно управляющих аэродинамическим рулем магистрального самолета // Известия ЮФУ — Технические науки. 2021. № 7. С. 41–51.
5. Константинов С. В., Редько П. Г., Ермаков С. А. Электрогидравлические приводы систем управления полетом маневренных самолетов. М.: Янус-К, 2006. С. 184–198.
6. Оболенский Ю. Г. Управление полетом маневренных самолетов. М.: Филиал Воениздат, 2007. 480 с.

ДИНАМИКА ЦЕРЕБРАЛЬНОЙ АНГИОАРХИТЕКТониКИ ПРИ НАЛИЧИИ СТРЕССОВОГО ФАКТОРА*

Д. В. Тихвинский, Ю. А. Станкевич,
Д. С. Чутков, Д. В. Паршин

*Институт Гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

Мозг — это активный метаболический орган человеческого организма. Для его функционирования необходимо много энергии [1]. Адекватная работа головного мозга обеспечивается благодаря хорошей васкуляризации. Сосудистая сеть головного мозга состоит из разветвленных, непрерывных «каналов», по которым циркулирует кровь. Достаточный кровоток обеспечивает транспорт кислорода, энергетических метаболитов и других питательных веществ в мозг, параллельно происходит элиминация побочных продуктов метаболизма мозга и токсинов [2]. Таким образом, нормальное функционирование мозга зависит от соответствия между метаболическими потребностями и удалением клеточных отходов. Нарушение этого равновесия приведет к ухудшению кровообращения мозга. У пациентов с длительным воздействием психоэмоциональных факторов и без повреждения внутримозговых структур фиксируется изменение мозгового кровообращения. Мозговое кровообращение формируется за счет слаженного взаимодействия сердечно-сосудистой, дыхательной и нервной систем. Изменение сосудистого сопротивления головного мозга происходит за счет сокращения или расслабления мозговых артерий. Эта гипотеза была представлена в 1959 году N. A. Lassen [1]. Авторы получили, что в результате воздействия стрессового фактора наблюдается снижение мозгового кровотока в передней поясной извилине и префронтальной коре. Однако установлено увеличение мозгового кровотока в белом веществе и различных корковых, подкорковых структурах, особенно в хвостом ядре [3].

Целью настоящей работы является оценка влияния факторов стресса и адаптации к нему на ангиоархитектонику церебральных сосудов и диффузию церебрального кровотока в бассейне передних мозговой артерии у здоровых добровольцев.

* Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 20-71-10034-П).

© Тихвинский Д. В., Станкевич Ю. А., Чутков Д. С., Паршин Д. В., 2025

Для целей проведения исследования нами была проанализирована выборка молодых здоровых добровольцев без патологий развития церебральных сосудов (20 человек). Для нужд исследования отбирались добровольцы как с опытом переноса стрессового фактора, так и без опыта. Группа подвергалась психологическому тестированию, а также МР-ангиографии в совокупности с исследованием МР-диффузии в бассейне передних мозговых артерий в различных по времени точках: в первой группа не испытывала воздействия заданного стрессового фактора, а во второй напротив испытывала воздействие стрессового фактора. Анкетирование добровольцев проводилось по методике оценки общего уровня стресса и его источников, уровня тревоги, депрессии и типа саморегуляции по контролю за действиями [4]. После этого проводилось численное моделирование течения крови в восстановленных конфигурациях сосудов головного мозга добровольцев, а также статистическая обработка результатов психологических тестов.

В результате было обнаружено изменение кровотока в бассейне передних мозговых артерий, а также качественное совпадение изменения кровотока по результатам измерения МР-перфузии и численного моделирования течения крови. Также было обнаружены изменения геометрии сосудов головного мозга. Кроме того, при интерпретации результатов после воздействия стрессового фактора происходит смещение результатов по опроснику «Уровень психоэмоционального напряжения» (УПН), а именно к блокам, отвечающим за удовлетворенность жизнью и ее условиями (УПН-2, УПН-3, УПН-4).

Список литературы

1. Liu M. et al. Cerebral blood flow self-regulation in depression // *Journal of Affective Disorders*. 2022. Vol. 302. P. 324–331.
2. Winkler E.A. et al. A single-cell atlas of the normal and malformed human brain vasculature // *Science*. 2022. Vol. 375, No. 6584. С. eabi7377.
3. Chiappelli J. et al. Depression, stress and regional cerebral blood flow // *J. of Cerebral Blood Flow & Metabolism*. 2023. Vol. 43, No. 5. С. 791–800.
4. Шапкин С.А. Экспериментальное изучение волевых процессов. М., 1997. 140 с.

УЧЕТ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ГАЗОВЗВЕСИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ*

Р. Р. Тлеуленов

Томский государственный университет, Томск

В работе [1] представлены результаты расчета видимой скорости горения газовзвеси угольной пыли с учетом лучистого теплообмена для различных значений массовой концентрации частиц. Установлено, что экстремум скорости горения газовзвеси угольной пыли по массовой концентрации частиц достигается при более высоких значениях концентрации по сравнению с расчетами без учета лучистого теплообмена. Показано, что скорость горения газовзвеси угольной пыли определяется составом газовзвеси, включая дисперсность частиц, содержание летучих компонентов в частицах, массовую концентрацию частиц и содержание горючих компонентов в газе.

В данном докладе исследовано влияние массовой концентрации и радиуса частиц на видимую и нормальную скорости горения газовзвеси угольной пыли в метановоздушной смеси с учетом лучистого теплопереноса.

Метод решения задачи соответствовал работам [2–4]. Основные предположения физико-математической модели соответствуют описанным в [4]. Предполагается, что угольная пыль равномерно распределена в метановоздушной смеси с заданной общей массовой концентрацией и размером частиц. Объемная доля частиц считается малой. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры. Учитывается тепловое и динамическое взаимодействие между частицами и газом. На поверхности частиц происходит гетерогенная реакция первого порядка по кислороду, скорость которой определяется с учетом массообмена. В газовой фазе протекают химические реакции между горючими компонентами (метаном) и окислителем.

Численные расчеты были выполнены при фиксированном содержании метана 6,5 %, радиусе частиц 5,5 мкм и варьировании массовой концентрации твердых частиц в диапазоне от 0,3 до 0,4 кг/м³.

* Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования (проект № FSWM-2025-0012).

© Тлеуленов Р. Р., 2025

Получено, что увеличение массовой концентрации частиц до $0,4 \text{ кг/м}^3$ ведет к возрастанию времени выхода на стационарный режим горения. При концентрации $0,3 \text{ кг/м}^3$ стационарный режим достигается примерно за $0,0331 \text{ с}$, в то время как в расчетах с более высокими концентрациями к моменту $0,0331 \text{ с}$ установившийся режим горения еще не сформировался.

Были получены зависимости температур газа и частиц от координаты вдоль канала в разные моменты времени. При увеличении массовой концентрации частиц угольной пыли с $0,2$ до $0,35 \text{ кг/м}^3$ существенно уменьшается разрыв температур между газом и твердой фазой. Если при низкой концентрации наблюдалась более выраженная разница между температурой частиц и окружающего газа, то при более высокой концентрации эта разница уменьшается, и температурные профили частиц и газа сближаются. Анализировались времена выхода системы на стационарный режим горения. При массовой концентрации $0,2 \text{ кг/м}^3$ установившийся режим горения достигается к $0,08 \text{ с}$, при концентрации $0,3 \text{ кг/м}^3$ — к $0,097 \text{ с}$. Для концентраций $0,22 \text{ кг/м}^3$ и $0,35 \text{ кг/м}^3$ по состоянию на $0,105 \text{ с}$ стационарный режим все еще не установлен.

Проводился анализ влияния размеров частиц на распределение температуры в канале при фиксированных условиях: содержании метана 6% , массовой концентрации твердых частиц $0,45 \text{ кг/м}^3$ и варьировании радиуса частиц в диапазоне от 2 до 3 мкм с шагом. На основе полученных расчетов было обнаружено, что при увеличении радиуса частиц возрастает разрыв температур между газом и твердой фазой. Особенно заметно это проявилось в случае с радиусом $3,5 \text{ мкм}$.

Список литературы

1. Тлеуленов Р.Р., Крайнов А.Ю. Исследование влияния лучистого теплообмена на скорость горения газовзвеси угольной пыли // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых (10–18 марта 2024 г., Новосибирск — Шерегеш). Новосибир. гос. ун-т. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2024. С. 177–178.
2. Моисеева К.М. и др. Исследование горения углекислотной взвеси в длинном закрытом канале // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58, № 5. С. 54–63.
3. Моисеева К.М. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование горения аэрозвеси угольной пыли в замкнутом сферическом объеме // Физика горения и взрыва. 2023. Т. 59, № 4. С. 93–101.
4. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu. Effect of radiation transport on minimal sparkplug ignition energy of nanosized coal-dust suspension // KEM. 2018. Vol. 769. P. 311–316.

УПРАВЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В СМЕСЯХ РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВ ДОБАВКАМИ ИНЕРТНЫХ КОМПОНЕНТ*

Д. А. Тропин

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

В работе проведено широкомасштабное теоретическое и численное исследование детонационных процессов в газовых смесях с дисперсными компонентами (пористыми фильтрами, облаками инертных частиц, завесами жидких капель) с целью управления взрывными процессами и срыва детонации. Получены следующие основные результаты.

Проведена классификация детонационных режимов взаимодействия детонационных волн с инертными компонентами. Найдены концентрационные и геометрические пределы детонации. Получены универсальные критерии срыва детонации, линейным образом связывающие диаметр и объемную концентрацию инертных компонент. Установлена неизменность концентрационных пределов при переходе от микроразмерных к наноразмерным инертным компонентам.

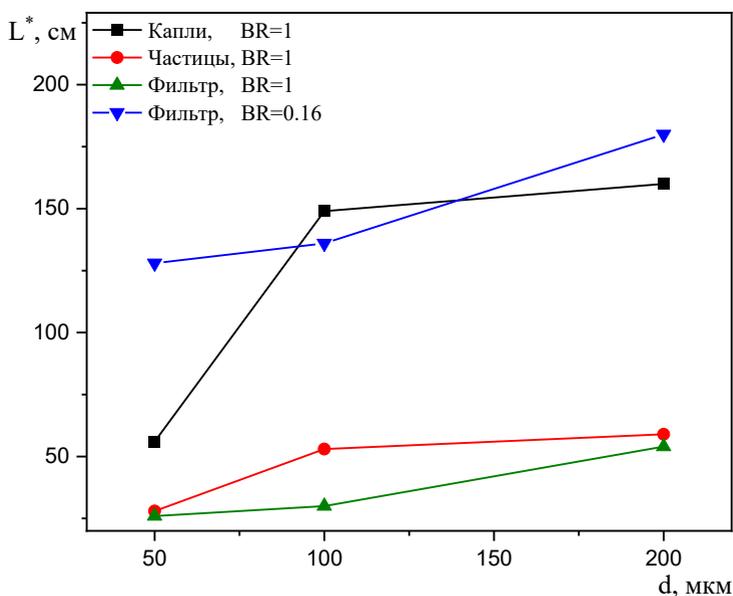
Определены геометрические пределы детонации — минимальные протяженности инертных компонент, приводящих к срыву детонации без последующего реинициирования. На рисунке приведены зависимости критических протяженностей завесы капель, облака частиц, фильтров, занимающих всю ширину канала, и фильтров, расположенных у верхней и нижней стенок канала, от диаметра инертной фазы. Видно, что наименьшие критические протяженности имеет фильтр, перекрывающий всю ширину канала. Чуть большие критические протяженности имеет облако частиц. Наибольшие критические протяженности у завесы инертных жидких капель.

Кроме того, из рисунка видно, что критические протяженности завес жидких капель близки к критическим протяженностям системы двух фильтров, расположенных у стенок канала. При этом, уровень перекрытия кана-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10083, <https://rscf.ru/project/21-79-10083/>, а также в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН (номер гос. регистрации: 124021400037-4).

© Тропин Д. А., 2025

ла в случае системы фильтров составляет всего 16 %, в то время как жидкие капли, частицы и фильтры перекрывают весь канал. Также видно, что критические протяженности системы фильтров примерно в 6 раз больше, чем фильтра, перекрывающего весь канал, однако толщина такой системы фильтров в 6 раз меньше. То есть объем системы фильтров при критической протяженности равен объему фильтра, перекрывающего весь канал, при критической протяженности. Таким образом, можно сделать вывод, что с технической точки зрения оптимальным для срыва детонации является система из двух фильтров, расположенных у стенок канала, поскольку такая система не препятствует течению газа в канале, ее объем равен объему фильтра, перекрывающему весь канал, и имеющему наименьшую критическую протяженность.



Зависимости критических протяженностей завесы капель, облака частиц, фильтра от диаметра

Полученные результаты выявляют механизмы воздействия дисперсных инертных и реагирующих компонент на детонационные процессы в газовых смесях и позволяют выработать практические рекомендации для управления и предотвращения взрывных и детонационных процессов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ПАРАФИНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПОТОКОМ ГОРЯЧЕГО ВОЗДУХА*

**В. А. Усанов, Г. В. Гембаржевский,
С. А. Рашковский, Н. С. Сиваков, С. Е. Якуш**

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва

В условиях растущего применения легкоплавких твердых топлив в промышленных процессах возникает необходимость проведения обширных исследований в данной области. Основные исследования направлены на изучение процессов плавления [1], так как они напрямую влияют на регрессию, а также горения топлива [2–3].

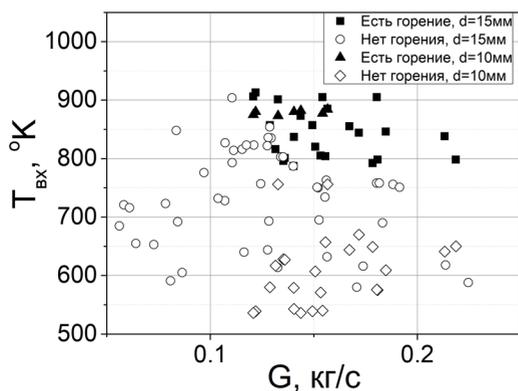
Экспериментальные исследования были проведены на специализированном оборудовании Лаборатории термодинамики и горения ИПМех РАН [3]. Целью экспериментов было изучение взаимодействия набегающего потока нагретого окислителя на исследуемый образец. Для изготовления исследуемого образца использовался парафин марки П2, обладающий низкой температурой плавления. Исходная заготовка имела форму прямоугольного бруска со скосом передней кромки под углом 30° и размерами $185 \times 50 \times 20$ мм (Д \times Ш \times В). В качестве окислителя использовался сжатый воздух. Давление в ресивере, куда закачивался воздух, изменялось в пределах от 1 до 4 МПа. Регулируя давление в ресивере и/или площадь критического сечения регулирующего крана, можно было менять расход воздуха в диапазоне 0,05–0,2 кг/с. Температура воздуха достигала 600°C , за счет прохождения через нагреватель кауперного типа. Управление расходом газовой среды осуществлялось путем варьирования давления в газовых баллонах и настройки регулирующего клапана. Весь процесс эксперимента фиксировался с использованием высокоскоростной камеры.

В ходе экспериментов было изучено горение парафина в высокотемпературном воздушном потоке при различных параметрах воздушного потока (температура, массовый поток). Для исследования использовались методы

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00703, <https://rscf.ru/project/24-19-00703/>

© Усанов В. А., Гембаржевский Г. В., Рашковский С. А., Сиваков Н. С., Якуш С. Е., 2025

высокоскоростной видеосъемки в видимом спектре и измерения характеристик процесса и рабочих параметров установки, таких как температура, давление и расход. При высоких температурах и массовой скорости газа наблюдались режимы самопроизвольного воспламенения парафина; в других случаях происходило мелкодисперсное распыление материала. На рисунке представлена граница воспламенения парафина. Было установлено, что при зажигании образец сгорает не над поверхностью, а в зоне обратного течения, которая образуется у задней кромки образца и служит стабилизатором пламени. Средняя скорость уменьшения массы образца была определена по изменениям массы во времени.



Результаты экспериментов в зависимости от температуры и расхода воздуха, воздействующего на парафин (пунктирной линией показана граница самовоспламенения парафина)

Также отдельно исследовались процессы плавления парафина. В результате экспериментального и численного исследования процессов плавления показаны характерные волны на поверхности расплава, возникающие вследствие развития неустойчивости Кельвина — Гельмгольца, а также определены длины волн, имеющие численное совпадение с теорией.

Список литературы

1. Kiskin A. B., Zarko V. E., Eremin I. V. Studying the paraffin based mixtures regression under high speed hot air blowing // Acta Astronautica. 2024. Vol. 216. P. 330–335.
2. Paravan C., Galfetti L., Bisin R., Piscaglia F. Combustion processes in hybrid rockets // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. 2019. Vol. 18. Iss. 3. P. 255–286. DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2019027834.
3. Усанов В. А., Гембаржевский Г. В., Рашковский С. А., Якуш С. Е. Экспериментальное определение параметров самовоспламенения твердого легкоплавкого топлива // Тезисы XVII Всероссийского симпозиума по горению и взрыву. 2024. С. 69–70.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУЛЕВОГО ПРИВОДА ПРИ УСКОРЕННОМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА

В. А. Феденюк

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский*

В современных летательных аппаратах в качестве исполнительных механизмов наиболее часто используются электрогидравлические рулевые приводы. На борту система рулевых приводов является одной из критически важных для безопасного полета систем, обладающая значительной сложностью. Обеспечение высокого качества регулирования под действием механической нагрузки (шарнирного момента) требует сохранения функциональности и реализуемых статических и динамических характеристик на протяжении всего срока эксплуатации привода.

Одним из способов повышения безопасности и организации эффективного обслуживания по состоянию возможно при использовании технологии ранней диагностики технического состояния. Подобная технология позволяет выявлять ухудшение характеристик привода и прогнозировать наступление отказных ситуаций в отдельных компонентах. Таким образом, с одной стороны, могут быть локализованы компоненты, дальнейшее использование которых без технического обслуживания представляет опасность, а с другой стороны, может продлиться ресурс для компонентов, в функционировании которых не обнаружены существенные отклонения, обусловленные процессами развития деградаций. Для разработки технологии диагностики создана методика, позволяющая проводить расчетные и натурные исследования при отработке сценариев работы привода, связанных с развитием деградаций и позволяющих накапливать данные, необходимые для построения классификаторов технического состояния. Методика предполагает отработку привода или его программной модели в 3 режимах: автономное воспроизведение статических и динамических режимов работы (приблизительно к наземной отработке в составе борта), отработка в замкнутом контуре с системой управления (соответствует нормальному функционированию в ходе полета) и режим форсированной работы, обеспечивающий ускорен-

ный износ. Для исследования натуральных процессов, связанных с развитием деградаций при ускоренном воспроизведении процессов износа, создана стендовая установка, и проведена отработка прототипа привода, в качестве которого используется сервопривод и накоплены данные необходимые для построения алгоритмов, используемых для ранней диагностики.

Для получения и обработки данных работе привода в различных технических состояниях разработано программное обеспечение, через которое происходит формирование заданных циклограмм согласно методике диагностики и автоматизированный процесс сбора данных как со стандартных датчиков привода, так и дополнительно установленных на привод для полноценного исследования его деградаций.

Полученные в ходе испытаний данные в дальнейшем будут использованы для построения классификаторов с использованием традиционных методов (сравнение сигналов натурной системы с пороговыми значениями и с сигналами программных моделей) и методов, основанных на машинном обучении, что позволит обеспечить как классификацию технического состояния, так и прогноз времени до наступления отказа.

Полученные результаты необходимы для подготовки к переходу технологии ранней диагностики на уровень, при котором система ранней диагностики может быть интегрирована в состав борта, что обеспечит эффективную и безопасную эксплуатацию системы рулевых приводов.

МИКРОВЗРЫВНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ СВОБОДНОПАДАЮЩИХ ДВУХЖИДКОСТНЫХ КАПЕЛЬ ПРИ МИКРОВОЛНОВОМ НАГРЕВЕ

Р. М. Федоренко, Д. В. Антонов, П. А. Стрижак

Томский политехнический университет, Томск

Перспективная технология организации вторичного измельчения пленок и капель топливных композиций базируется на их микровзрывной фрагментации в многофазных и многокомпонентных потоках. Микровзрывной фрагментация позволяеткратно увеличить площадь поверхности испарения жидкости и ее химического реагирования за счет быстрого измельчения исходных пленок и капель жидкостей до нескольких десятков микрон [1]. Данные эффекты реализуются вследствие интенсивного подвода тепла к гетерогенным жидкостям, в которых в качестве дисперсной фазы выступает легколетучий низкокипящий компонент (вода, фреоны, кислоты, спирты), а в качестве несущей — высококипящий компонент (углеводородные топлива, масла, жидкие металлы) [2].

При использовании традиционных схем нагрева прогрев материала происходит от поверхности к внутренней части, при этом тепло подводится за счет одного из трех механизмов подвода энергии (или их комбинаций): конвективный, кондуктивный и радиационный. При этом существуют значительные потери энергии за счет нагрева окружающего газа или теплоизоляции. Сверхвысокочастотный (СВЧ) нагрев существенно отличается от традиционных схем нагрева, поскольку подводимая энергия не рассеивается в окружающей среде, а подводится в объем нагреваемого объекта.

Анализ результатов исследований [3] дает представление о процессах нагрева, зажигания и фрагментации слоев и капель различных горючих компонентов при микроволновом нагреве. Целесообразным представляется определение влияния введения воды в состав топлива для организации процессов вторичного измельчения при микроволновом нагреве.

В качестве источника микроволнового излучения используется магнетрон с фиксированной частотой 2,45 ГГц мощностью 1000 Вт. В качестве направляющей электромагнитного излучения использовался алюминиевый

прямоугольный волновод, предназначенный для работы в диапазоне частот 1,72–2,60 ГГц с сечением 109 × 55 мм).

В качестве компонентов двухжидкостных капель использовались дистиллированная вода и типичные для энергетических технологий, а также технологиях термической и огневой очистки жидкостей от примесей жидкости (растительные масла и углеводороды).

Сопло для подачи капель жидкости располагалось на высоте 1 см от среза волновода. Для подачи жидкости к соплу использовался шприцевой насос. При подаче жидкости исследуемые капли отрывались от сопла и двигались под действием силы тяжести. В процессе свободного падения капли проходили срез волновой направляющей, где подвергались воздействию микроволнового излучения, интенсивно прогреваясь до достижения условий микровзрывной фрагментации.

Проведенные эксперименты позволили установить характерные времена задержки микровзрывного распада двухжидкостных капель в зависимости от группы параметров и факторов: начальных размеров капель, типа и концентрации компонентов, начальной температуры жидкости. Установлены типичные распределения образующихся вторичных фрагментов по размерам и количеству. Средние размеры вторичных фрагментов варьировались в широком диапазоне 50–150 мкм, минимальные достигали 5 мкм, максимальные — 300 мкм. Обосновано применение микроволнового нагрева для интенсификации процессов вторичного измельчения капель гетерогенных жидкостей для формирования топливовоздушной смеси применительно к подготовке топлив к сжиганию в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

Список литературы

1. Amani A., Jalinejad E., Mousavi S.M. Simulation of phenol biodegradation by *Ralstonia eutropha* in a packed-bed bioreactor with batch recycle mode using CFD technique // *J. Ind. Eng. Chem.* 2018. Vol. 59. P. 310–319.
2. Antonov D. V., Fedorenko R. M., Strizhak P. A. Micro-Explosion Phenomenon: Conditions and Benefits // *Energies.* 2022. Vol. 15. P. 7670.
3. Li D., Hou Y., Yu Y. Effect of Microwave Antenna Material and Diameter on the Ignition and Combustion Characteristics of ADN-Based Liquid Propellant Droplets // *Energies.* 2024. Vol. 17. P. 4256.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРОТЕЗОВ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ *

А. А. Филиппов, М. И. Цветков, К. Е. Первухин, М. Р. Сухова

*Институт машиноведения
им. Э. С. Горкунова УрО РАН, Екатеринбург*

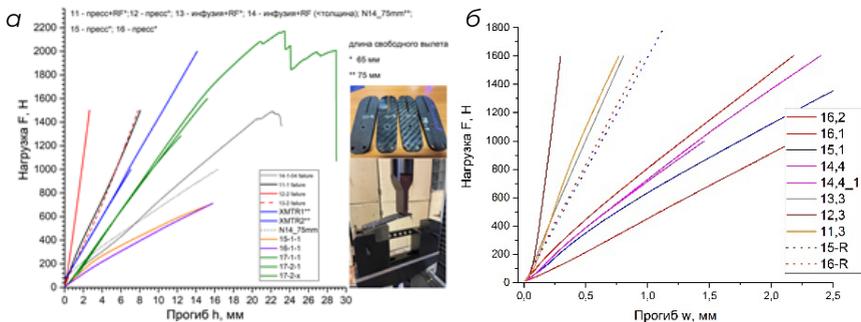
Активно развивающимся направлением использования углепластиковых композиционных материалов является проектирование и производство биомедицинских конструкционных материалов и устройств: элементов экзоскелетов, бандажей, протезов и ортезов конечностей. Минимальные по отношению к другим материалам удельные упруго-прочностные характеристики конструкций ортезов и протезов позволяют обеспечивать быстрое восстановление пациентов, обеспечение его мобильности и высокого качества жизни. Подбор типа устройства протеза связан с большим количеством факторов, таких как степень ампутации, уровень активности пациента и др. Выбор укладки армирующих волокон в объеме, типа связующего, технологии производства [1] углепластиков существенно влияет на упруго-прочностные свойства проектируемых конструкций протезов и к настоящему времени отсутствует конструкция протеза стопы, удовлетворяющая различным уровням нагрузки, физической активности и функциональности. Цель данной работы состоит в разработке оснастки и методик испытания элементов конструкций углепластиковых протезов стоп низкого профиля для сравнительной оценки жесткости.

Стандарт механических испытаний предполагает испытание конструкции протеза стопы в сборе в соответствии с задаваемыми осями и углами постановки стопы, что не дает возможность поэтапно совершенствовать элементы конструкции. В настоящей работе предложены два способа определения жесткости конструкции заданной геометрии, заключающиеся в оценке упруго-прочностных свойств верхней пластины углепластикового протеза стопы.

Образцы композитных материалов получены методом прямого прессования препрега в пресс-форме заданной геометрии. Расположение слоев и их укладка, а также тип и направление армирования углепластика подбира-

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки России по теме № 124070500003-6.

© Филиппов А. А., Цветков М. И., Первухин К. Е., Сухова М. Р., 2025



Диаграммы нагрузка-перемещение для различных типов укладки углеволокна при консольном (а) и трехточечном изгибе (б)

лась из учета обеспечения жесткости конструкции на изгиб. Всего было испытано 6 типов укладки при заданной геометрии образцов. Испытания проводились в два этапа: на первом этапе образцы оценивались на проверочную прочность в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22523–2007. Процедура заключалась в единичном цикле линейного нагружения образца до нагрузки $F = 1500$ Н с последующей выдержкой в течение 10 секунд и дальнейшей линейной разгрузкой, в ходе чего фиксировалась величина прогиба. На втором этапе оценивалась предельная прочность — это была статическая нагрузка, которую протез может выдерживать, но ее применение может привести к потере работоспособности устройства. Также фиксировались величина разрушающей нагрузки и максимальный прогиб образца, а на каждом этапе записывались диаграммы прикладываемой нагрузки в зависимости от прогиба образца. Показано что за счет выбора укладки и типа углеволокна прогиб конструкции можно варьировать от 2 до 18 мм при консольном изгибе, и от 0,2 до 2 мм при трехточечном изгибе.

Результаты. Показано, что рассмотренные методики испытаний позволяют качественно сравнивать элементы углепластиковых протезов стоп по жесткости. Процесс варьирования слоев в раскладке позволяет не только оптимизировать жесткость протеза, но также точно подбирать его для конкретных клинических случаев, учитывая потребности и особенности каждого пациента.

Список литературы

1. Filippov A.A., Karnaukhov Yu. D, Lutoshkin E.A., Yadrenkin M.A., Losev V.M., and Sukhova M.R. Comparing the mechanical properties of rubber-doped carbon-fiber-reinforced plastics produced by vacuum infusion and compression molding // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2024. Iss. 6. P. 170–183.

ВЛИЯНИЕ НЕПАРАЛЛЕЛЬНОСТИ ЛИНИЙ ТОКА НА РАЗВИТИЕ ЛИНЕЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОТРЫВЕ ЗА ОБРАТНОЙ СТУПЕНЬКОЙ*

М. М. Харюшина, А. В. Бойко

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

Известно, что течения в локальных отрывах пограничного слоя неустойчивы по отношению к малым вихревым возмущениям [1]. Однако то, насколько непараллельность линий тока и изменение профиля скорости в зоне отрывного течения оказывает влияние на данные, получаемые при локальном подходе (уравнение Орра-Зоммерфельда), остается малоизученным [2].

Цель работы — изучить развитие линейных возмущений в отрыве за обратной ступенькой в CFD платформе OpenFOAM. В основе работы реализация кода, позволяющего вводить трехмерные возмущения через линеаризованные граничные условия колебаний мембраны на стенке (условия Бенджамина), включая наклонные бегущие волны и стационарные вихри.

Расчет состоит из двух этапов. На первом этапе рассчитываются поля скоростей и давления основного течения стандартными трехмерными решателями уравнений Навье — Стокса из пакета OpenFOAM. Эти данные используются как параметры, передаваемые наравне с характеристиками источника возмущений (частота, поперечное волновое число, форма мембраны) в разработанный решатель трехмерных линеаризованных уравнений Навье — Стокса.

Работа созданных трехмерных решателя и источника проверена расчетом развития двумерных и трехмерных возмущений в течениях Блазиуса пограничного слоя и Пуазейля плоского канала. В первом случае входной профиль генерировался специально разработанным входным граничным условием со встроенным в него решателем уравнения Блазиуса (на основе библиотеки решателей ОДУ OpenFOAM). Получаемый в автомоделных координатах профиль Блазиуса далее масштабировали для получения требуемой толщины пограничного слоя на входе и скорости потока. Во втором

* Работа поддержана грантом РФФ № 23-19-00644.

© Харюшина М. М., Бойко А. В., 2025

случае использовалась стандартная реализация. Выбор канала для тестов обусловлен тем, что он удобен для проверки нового кода: линии тока в канале параллельные, а значит сравнение с результатами решения локальной задачи устойчивости на основе уравнения Орра — Зоммерфельда можно провести без дополнительных ограничений. Также известно, что влияние непараллельности на развитие возмущений в пограничном слое Блазиуса мало, а кривизна стенки отсутствует. Так как решаются полные трехмерные уравнения Навье — Стокса, то на боковых краях расчетной области ставились трехмерные (циклические) граничные условия.

Тесты показали, что в обоих случаях генерируются двумерные возмущения, идентичные по форме получаемым в рамках решения локальной теории устойчивости. Дальнейшая обработка полученных данных (с помощью преобразования Фурье осциллограмм поперечной компоненты скорости, взятых в центре канала на различных расстояниях от входа) показала, что скорость нарастания сходится к расчетной с увеличением числа узлов сетки. Также было показано, что характеристики получаемых возмущений вдали от источника в параллельных и квазипараллельных течениях при надлежащем выборе сеток соответствуют прогнозам, получаемым на основе локальной теории гидродинамической устойчивости. Сделаны рекомендации по выбору сеток. Таким образом выполнена валидация разработанного кода.

В презентации будут также представлены результаты сравнения расчетов для отрывных течений разработанным кодом и локальными решениями линейной задачи устойчивости с помощью уравнения Орра — Зоммерфельда.

Список литературы

1. Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях. / Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. 304 с.

2. Dovgal A. V., Kozlov V. V., Michalke A. Contribution to the instability of laminar separating flows along axisymmetric bodies. Part II. Experiment and comparison with the theory // *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 1995. Vol. 14, No. 3. P. 351–365.

**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ СТО СМК 7-156-2023
«АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ МАЛЫХ ДОЗВУКОВЫХ
СКОРОСТЕЙ. ТИПОВАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ
СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА»**

С. Ю. Хижняк, О. В. Довыденко, А. И. Самойленко

*Центральный аэрогидродинамический институт
им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский*

В апреле 2023 года в ФАУ «ЦАГИ» утвержден и введен в действие стандарт СТО СМК 7-156-2023 «Аэродинамические трубы малых дозвуковых скоростей. Типовая методика измерений скорости воздушного потока», который распространяется на аэродинамические трубы (АДТ) малых дозвуковых скоростей, устанавливая унифицированный подход к измерению скорости воздушного потока в диапазоне от 3 до 150 м/с. Погрешность измерений скорости воздушного потока составляет $\pm 0,2$ м/с для контрольных средств измерений (СИ) при аттестации и $\pm 1,0$ м/с для трубных СИ при проведении испытаний и исследований в этих трубах.

Работа началась с анализа применяемых в ЦАГИ методов обработки результатов измерений и СИ, которые отличались точностью, условиями эксплуатации, функциями преобразования и видами выходных сигналов [1], при этом затраты времени на разработку и аттестацию отдельной методики измерений (МИ) для каждой АДТ были чрезмерно высоки. Новый стандарт, предусматривающий унификацию применяющихся СИ, значительно упростил процесс аттестации всех АДТ ЦАГИ.

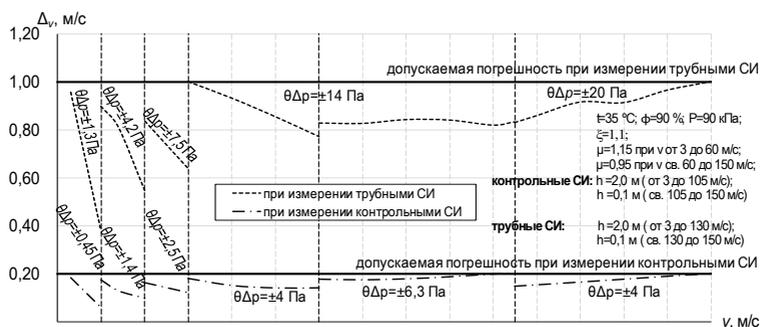
При разработке стандарта проведено математическое моделирование измерений скорости воздушного потока без загрузки РЧ (при аттестации АДТ) и скорости набегающего воздушного потока при загрузке РЧ моделью (при испытаниях в АДТ). Разработаны 4 новые модели измерений скорости воздушного потока для АДТ с открытой или закрытой рабочими частями (РЧ) для обоих случаев. В математические модели введены поправки, учитывающие сжимаемость воздуха, положение датчиков температуры, влажности и атмосферного давления. Разработаны требования к допускаемой погрешности применяемых СИ (таблица), а также к виду выходного сигнала, к вспомогательным устройствам и характеристикам поля АДТ [2].

Описаны ограничения метода по климатическим условиям измерений, расположению датчиков атмосферного давления. Сравнительный анализ суммарной погрешности, характерной для рекомендованных стандартом средств и условий измерений, а также алгоритмов обработки результатов измерений представлен на рисунке. Типовая МИ аттестована и зарегистрирована в Федеральном информационном фонде (регистрационный номер: ФР.1.28.2023.46060), а также успешно применена в АХТ СД и Т-105.

Результаты работы планируется использовать для разработки национального стандарта, распространяющегося на промышленные АДТ, что обеспечит единый подход к измерениям и повысит их эффективность.

Требования к погрешности измерений применяемых средств измерений

Измеряемый параметр	Диапазон измерений скорости воздушного потока	Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений контрольных СИ в условиях измерений	Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений трубных СИ в условиях измерений
Δp	от 3 до 10 м/с	$\pm 0,45$ Па	$\pm 1,3$ Па
	от 10 до 20 м/с	$\pm 1,40$ Па	$\pm 4,2$ Па
	от 20 до 30 м/с	$\pm 2,5$ Па	$\pm 7,5$ Па
	от 30 до 60 м/с	$\pm 4,0$ Па	$\pm 14,0$ Па
	от 60 до 105 м/с	$\pm 6,3$ Па	
	от 105 до 150 м/с	$\pm 4,0$ Па	$\pm 20,0$ Па
p	от 3 до 150 м/с	± 120 Па	
δP		± 30 Па	
t		$\pm 0,2$ °C	$\pm 0,7$ °C
φ		± 4 %	



Суммарная погрешность измерений скорости воздушного потока

Список литературы

1. Хижняк С. Ю., Довыденко О. В., Самойленко А. И. Погрешность типовой методики измерений скорости воздушного потока в аэродинамических трубах малых дозвуковых скоростей // Измерительная техника. 2023. № 1. С. 8–15. DOI: doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-1-8-15.

2. Хижняк С. Ю., Довыденко О. В., Самойленко А. И. Стандартизация методики измерений скорости воздушного потока в промышленных АДТ малых дозвуковых скоростей // КИМИЛА 2023. Мат-лы V отраслевой конф. по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов. 2023. С. 249–257.

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРА ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОЙ И ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН*

В. В. Химуля, Ю. Ф. Коваленко, В. И. Карев, С. О. Барков

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва

Современное смещение приоритетов в сторону наращивания и разработки сложных скважин на месторождениях углеводородов требует применения новых технологий и решений, направленных на повышение эффективности их эксплуатационных характеристик и снижения рисков аварий [1]. Особенно это касается коллекторов газовых и газоконденсатных месторождений арктического шельфа, которые представлены слабосцементированными высокопроницаемыми песчаниками, обладающими низкими прочностными характеристиками. Происходящие под действием напряжений деформирование и разрушение горных пород оказывают существенное влияние на их фильтрационные свойства и влияют на продуктивность скважин, а также могут приводить к серьезным авариям, влекущим огромный экологический и экономический ущерб [2].

Одним из характерных осложнений, возникающих при эксплуатации газовых скважин в пластах, образованных слабосцементированными породами, является пескопроявление, когда совместно с флюидом в скважину поступает песок из пласта [3]. Это приводит к образованию песчаных пробок, а также выносу песка по дальнейшей технологической цепочке, что сказывается не только на снижении дебитов, но и на износе внутрискважинного и наземного оборудования и, как следствие, существенному увеличению экономических потерь вследствие снижения производительности, затрат на текущий и капитальный ремонт скважин, очистки флюида от механических примесей [4].

В докладе описаны результаты применения комплексного разностороннего подхода к изучению процессов деформирования, фильтрации, разру-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-01037, <https://rscf.ru/project/23-77-01037/>

© Химуля В. В., Коваленко Ю. Ф., Карев В. И., Барков С. О., 2025

шения и пескопроявления в окрестности скважин Северо-Каменномысского газоконденсатного месторождения, расположенного на северном шельфе России. Исследования включают: 1) проведение истинно трехосных испытаний для изучения процессов деформирования, фильтрации и разрушения в окрестности скважин; 2) проведение опытов по изучению процессов пескопроявления в условиях изменения напряженного состояния в окрестности скважин; 3) неразрушающий цифровой анализ трещин, фракционного состава матрицы породы и песка, выносимого в результате проведения опытов.

Механическая часть исследований проводилась на уникальной Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН) лаборатории геомеханики ИПМех РАН. Цифровые неразрушающие томографические исследования выполнены на высокоразрешающем рентгеновском микротомографе Procon CT-MINI.

На основе проведенных исследований для условий конкретного месторождения получены следующие результаты: 1) исследовано влияние изменения давления в скважине на деформационные и фильтрационные свойства призабойной зоны скважин; 2) определены напряженные условия инициации разрушения пород на стенках скважин; 3) определен тип и характер разрушения пород в окрестности скважины; 4) исследованы характеристики пескопроявления, включая условия инициации, зависимость интенсивности выноса песка от изменения напряженного состояния; 5) исследован фракционный состав матрицы коллектора и песка. На основе результатов исследования определены оптимальные для условий данного шельфового месторождения параметры для безопасной и эффективной эксплуатации скважин изучаемого объекта: 1) определены безопасные для устойчивости стволов скважин величины депрессий; 2) описан характер разрушения ствола скважины и призабойной зоны, локализованы очаговые точки инициации разрушения на стенках скважины; 3) определены оптимальные характеристики внутрискважинных фильтров для эффективного контроля пескопроявления.

Список литературы

1. Seyyedattar M., Zendejboudi S., Butt S. Technical and non-technical challenges of development of offshore petroleum reservoirs: Characterization and production // *Natural Resources Research*. 2020. Vol. 29, No. 3. С. 2147–2189.

2. Mahmud H. B., Leong V. H., Lestario Y. Sand production: A smart control framework for risk mitigation // *Petroleum*. 2020. Vol. 6, No. 1. С. 1–13.

3. Изюмченко Д. В., Чарыков В. М., Злобина М. А. Эксплуатация газовых скважин в условиях активного притока воды и песка // *Вести газовой науки*. 2018. № 1. С. 33.

4. Попов М. А., Петраков Д. Г. Исследование режимов работы газовых скважин в осложненных условиях // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Нефть, газ и нефтехимия*. 2021. Т. 21, № 1. С. 36–41.

СПЕЦИФИКА ТРАНСФОРМАЦИИ ВИХРЕЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ НА СТРЕЛОВИДНОМ КРЫЛЕ*

**А. Д. Черепанов, А. В. Бойко,
В. И. Бородулин, А. В. Иванов, Д. А. Мищенко**

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

Снижение аэродинамического сопротивления летательных аппаратов является одной из приоритетных задач в современной аэродинамике. Одним из наиболее эффективных решений этой задачи является затягивание ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП), т. е. ламинаризация. Эффективность ламинаризации обусловлена тем, что при высоких числах Рейнольдса, характерных для крейсерского полета коммерческого самолета, трение ламинарного потока о поверхность ЛА почти на порядок ниже турбулентного.

Как известно, ламинарно-турбулентный переход на стреловидных крыльях обусловлен неустойчивостью поперечного течения (НПТ). Профиль поперечного течения в пограничном слое имеет точку перегиба, из-за этого в пограничном слое стреловидного крыла в окрестности передней кромки возникают стационарные вихри НПТ, амплитуда которых нарастает вниз по потоку. Нарастающие вниз по потоку вихри существенно деформируют ламинарное течение, до тех пор, пока не происходит его разрушение вследствие возникновения локальной вторичной высокочастотной неустойчивости [1]. Таким образом, ламинаризация пограничного слоя на стреловидном крыле должна быть направлена прежде всего на подавление зарождения и усиления вихрей НПТ.

Данная работа посвящается исследованию развития вихрей НПТ вниз по потоку от передней кромки стреловидного крыла, вопросам изменения их поперечного масштаба и амплитуды в зонах линейного и нелинейного нарастания, изучению продольных вихреобразных продольных структур зонах ламинарно-турбулентного перехода и в зоне развитой турбулентности [2].

Исследование течения в пограничном слое стреловидного крыла проводилось на экспериментальной модели СК-45 с углом стреловидности 45°

* Работа поддержана грантом РФФ № 23-19-00644.

в малотурбулентной дозвуковой аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН. Модель крыла имеет ламинаризованный профиль НАСА67 1-215 с расширенной зоной благоприятного градиента давления для того, чтобы усилить неустойчивость поперечного течения. Также для этого модель крыла была установлена под углом атаки к потоку -5° .

Для исследования эволюции вихрей НПТ в пограничном слое был выбран метод количественной термографии [3] с дальнейшей обработкой тепловизионных данных в новой программе, специально разработанной для анализа поперечных масштабов детектируемых вихрей, оценки корреляции продольных вихрей и структур, наблюдаемых на всех этапах ламинарно-турбулентного обтекания, а также качественной оценки эволюции их амплитуд вниз по потоку.

В докладе будут рассмотрены несколько вариантов возбуждения вихрей НПТ: случайная шероховатость передней кромки стреловидного крыла с возбуждением вихрей НПТ случайного поперечного масштаба и возбуждение вихрей НПТ выделенного контролируемого поперечного масштаба по отработанной методике размещения на поверхности передней кромки модели крыла дискретных элементов шероховатости дискообразной формы с соответствующим периодом (discrete roughness elements — DRE) [4].

В докладе будут представлены результаты проведенной работы, включающие изменение преобладающих поперечных масштабов вихрей НПТ вниз по потоку в разных случаях, степень корреляции вихрей и продольных структур, находящихся на разных стадиях развития (в ламинарной зоне, зонах ЛТП и турбулентности) и оценку изменения интенсивности детектируемых продольных структур вниз по потоку.

Список литературы

1. Borodulin, V. I., Ivanov, A. V., Kachanov, Y. S., Swept-wing boundary-layer transition at various external perturbations: Scenarios, criteria, and problems of prediction // *Physics of Fluids*. 2017. Vol. 29, No. 9. P. 094101.1–094101.26.
2. Бойко А. В., Бородулин В. И., Иванов А. В., Мищенко Д. А., Черепанов А. Д. Детерминированные продольные структуры в турбулентном пограничном слое стреловидного крыла // XV Сибирский теплофизический семинар, посвященный 110-летию со дня рождения С. С. Кутателадзе и 300-летию Российской академии наук: тезисы докладов. Новосибирск, 20–23 авг. 2024 г. Новосибирск, 2024. С. 117.
3. Boiko A. V., Ivanov A. V., Borodulin V. I., Mischenko D. A. Quantification technique of transition to turbulence in boundary layers using infrared thermography // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 185. P. 122065.
4. Borodulin V. I., Ivanov A. V., Kachanov Y. S., Hanifi A. Laminar-turbulent transition delay on a swept wing // *AIP Conf. Proc.* 2016. Vol. 1770, No. 030065. P. 1–12.

ДИНАМИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА ПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОАНОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

М. А. Шихова, О. И. Вишняков, П. А. Поливанов

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

Пленочные термоанометрические датчики активно используются при исследовании нестационарных течений жидкости и газа. Например, в работе [1] пленочные датчики были использованы для исследования трансзвукового течения. Для корректного анализа нестационарных данных, получаемых пленочными датчиками, необходимо знать их ограничения по измеряемому частотному диапазону, что можно выяснить выполнив динамическую калибровку. В работе [2] для получения частотных характеристик использовался лазерный импульс. Преимущество данного метода заключается в возможности проведения калибровки непосредственно при проведении измерений, но в данном подходе метод воздействия на датчик существенно отличается от процессов взаимодействия датчика с потоком. В данной работе апробируется методика динамической калибровки пленочных датчиков в ударной трубе.

На рис. 1 показана схема экспериментального стенда, который состоял из: ударной трубы; двух датчиков давления РСВ113В28 с предусилителем; вакуумного насоса; термоанометра постоянного сопротивления (ТПС); осциллографа; системы сбора информации на базе АЦП LTR210. Ударная труба имела длину 2,1 м и диаметр 5 см. Перед пуском в ударной трубе создавалось разрежение относительно атмосферного давления (P_1), после чего осуществлялся разрыв диафрагмы. Скорость ударной волны определялась по показаниям датчиков давления. Пленочный датчик устанавливался на удалении 28 см от торца ударной трубы, что обеспечивало не менее 1 мс до прихода отраженной ударной волны.

Исследования были выполнены при перегреве датчика, равном 1,4. Настройка операционного усилителя термоанометра должна была обеспечивать частотный диапазон 0–100 кГц. На рис. 2 показаны примеры показаний пленочного датчика при прохождении ударной волны. Постоянная

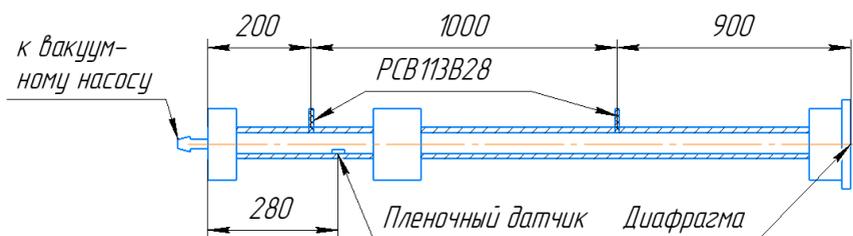
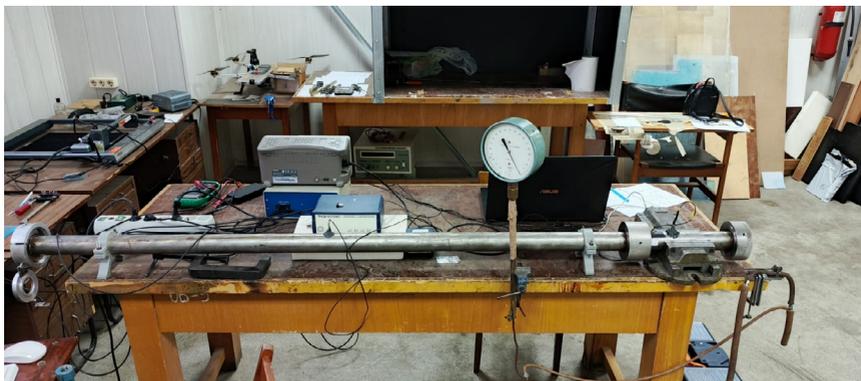


Рис. 1. Фотография и схема экспериментального стенда

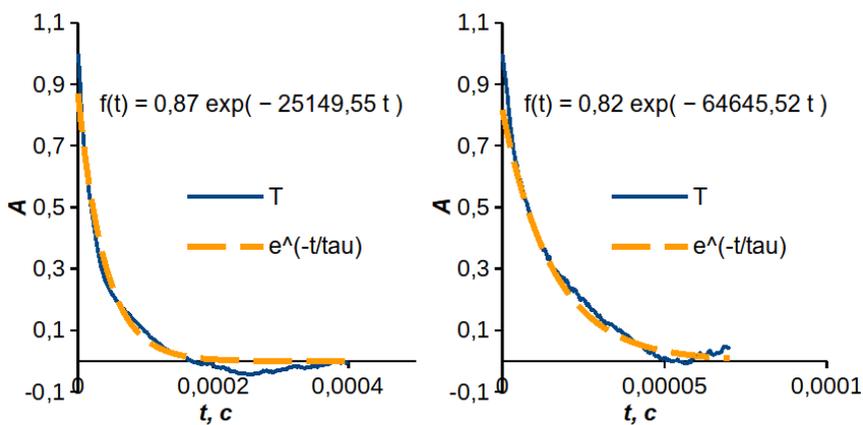


Рис. 2. Пример отклика сигнала датчика на ударную волну:
 а — $P_1 = 10$ кПа; б — $P_1 = 25$ кПа

времени оценивалась по характеру падения экспоненциальной зависимости. Из полученных данных видно, что для давления $P_1 = 10$ кПа постоянная времени равняется $\approx 3,98$ мкс, а для $P_1 = 25$ кПа — $\approx 1,55$ мкс, что меньше частотного диапазона на который был настроен операционный усилитель ТПС. В результате этой работы получено, что для корректной интерпретации спектральных характеристик, измеряемых пленочными датчиками ТПС, обязательно проведение динамической калибровки.

Список литературы

1. Вишняков О.И., Поливанов П.А., Бунтин Д.А. Использование поверхностных датчиков термоанемометра при анализе данных, полученных PIV-методом // Прикладная механика и техническая физика. 2024. Т. 65, № 2. С. 110–114.
2. Бунтин Д.А., Вишняков О.И., Поливанов П.А., Сидоренко А.А., Громыко Ю.В. Определение амплитудно-частотных характеристик системы В«термоанемометр + датчик» по лазерному импульсу // Теплофизика и аэромеханика. 2024. № 1. С. 145–153.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМОВ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН ПРИ НАЛИЧИИ НАКЛОННОЙ СТЕНКИ*

Н. Д. Шмакова, Е. В. Ерманюк

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

Экспериментальные и численные данные, полученные во вращающихся системах при наличии возмущения и топографии дна, демонстрируют наличие сложной волновой структуры, требующей тщательной пост-обработки [1–4]. В зависимости от моделируемого процесса, интерпретация полученной волновой картины может быть как очевидной (численные данные при малой амплитуде возмущения), так и практически невозможной (нестандартная геометрия, умеренные и большие амплитуды возмущения). В последнем случае, богатый частотный спектр усложняется наличием сложного спектра волновых векторов, и ручная выборка волновых частот и векторов, удовлетворяющих условиям триадного резонанса, не представляется возможной.

В данной работе предпринята попытка автоматизировать алгоритм поиска таких волновых векторов при помощи построения бикогерентности по времени и по пространству. Ранее подобная методика уже применялась в исследовании поверхностных гравитационных волн [5]. Тестирование методов проводилось на данных численных расчетов во вращающемся цилиндрическом слое с коническим дном и осесимметричными возмущениями на крышке. На рисунке показана картина завихренности в экваториальном сечении в режиме триадного резонанса (см. рисунок, *a*) и развитой волновой турбулентности (см. рисунок, *z*). Для таких режимов ранее уже были построены спектрограммы и картины волновой энергии [1].

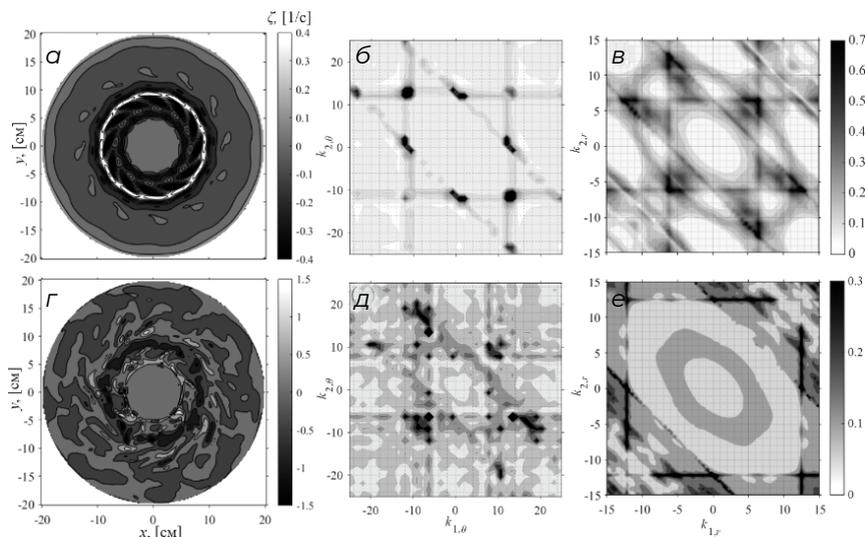
Бикогерентность является нормированным квадратным биспектром и принимает значения от 0 до 1, где 1 соответствует идеальной корреляции между тремя частотами или волновыми векторами. Бикогерентность по пространству вычисляется по формуле:

$$B(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) = \frac{\left| \langle \tilde{v}(\mathbf{k}_1, t) \tilde{v}(\mathbf{k}_2, t) \tilde{v}^*(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2, t) \rangle \right|}{\sqrt{e(\mathbf{k}_1) e(\mathbf{k}_2) e(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2)}},$$

* Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-41-00090.

© Шмакова Н. Д., Ерманюк Е. В., 2025

где $\tilde{v}(\mathbf{k}, t)$ — Фурье-образ азимутальной компоненты скорости, $\mathbf{k} = (k_r, k_\theta)$ — волновой вектор, * означает комплексное сопряжение, $\langle \rangle$ — осреднение по времени и $e(\mathbf{k}) = \langle |\tilde{v}(\mathbf{k}, t)|^2 \rangle$. Для малых возмущений яркие точки соответствуют азимутальным волновым числам 12 и -12 (см. рисунок, б). При увеличении амплитуды возмущения, помимо ± 12 появляются дополнительные волновые числа ± 10 и ± 7 (см. рисунок, д), что согласуется с ранее полученными результатами. Картина бикогерентности при фиксированных азимутальных числах более сложная в интерпретации и нуждается в дальнейшем анализе (см. рисунок, в, е).



Данные во вращающемся цилиндрическом слое с коническим дном для амплитуд возмущения $a = 1$ (верхний ряд) и 2 мм (нижний ряд): а, г — картина завихренности в экваториальном сечении; б, д — бикогерентность по пространству при фиксированном радиусе $R = 8$ см; в, е — и осредненный по азимуту θ

Список литературы

1. Boury S., Sibgatullin I., Ermanyuk E., Shmakova N., Odier P., Joubaud S., Maas L.R.M., Dauxois T. Vortex cluster arising from an axisymmetric inertial wave attractor // J. Fluid Mech. 2021. Vol. 926. A12.
2. Subbotin S., Shmakova N., Ermanyuk E., Kozlov V. Stewartson layer instability and triadic resonances in rotating sphere with oscillating inner core // Phys. Fluids. 2022. Vol. 34. P. 064103.

3. Subbotin S., Shmakova N., Kozlov V., Ermanyuk E. Nonlinear regimes of inertial wave attractors generated by a precessing lid: Zonal flows and Rossby waves // *Phys. Fluids* 2023. Vol. 35. P. 074110.
4. Subbotin S., Shiryaeva M., Shmakova N., Ermanyuk E. Zonal flow instability induced by nonlinear inertial waves in a liberating cylinder with sloping ends // *Phys. Fluids* 2024. Vol. 36. P. 1124121.
5. Mordant N., Falcon E. Experiments in surface gravity-capillary wave turbulence // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2021. Vol. 54. P. 1–25.

МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ РАСЧЕТА ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА *

В. И. Шукало

Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Моделирование гидроразрыва пласта (ГРП) играет ключевую роль в прогнозировании и оптимизации формирования трещин в нефтегазовых резервуарах. Этот процесс позволяет разрабатывать оптимальные стратегии стимуляции, включая выбор объемов закачки и концентраций добавок, что снижает затраты ресурсов, увеличивает добычу углеводородов и рентабельность месторождений, а также уменьшает операционные риски.

Рост трещин и движение жидкости в них описываются уравнениями теории упругости, сопряженными с уравнениями течения в тонком слое в приближении теории смазки. Для описания этих процессов используется модель *planar3D* [1], которая учитывает слоистую структуру резервуара и применима независимо от соотношения длины и высоты трещины. Эта модель обладает большей универсальностью по сравнению с классическими подходами (PKN, KGD, Pseudo3D), сохраняя при этом приемлемую вычислительную сложность. Однако, с увеличением числа элементов расчетной сетки значительно возрастает время вычислений, что делает задачу оптимизации алгоритма актуальной.

Цель данной работы — оптимизировать модель *planar3D* на примере симулятора *PuFrac* [2]. Для этого были выявлены наиболее ресурсоемкие компоненты программы. Анализ производительности программы показал, что 80 % времени расчета затрачивается на решение линеаризованной упруго-гидродинамической системы с использованием прямого метода решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Для ускорения процесса внедрены итерационные методы с разреженным ILU-предобуславливателем, что позволило добиться ускорения до 80 %.

При моделировании распространения трещин в слоистых по сжимающим напряжениям резервуарах возникают проблемы со сходимостью итерационного алгоритма для разрешения нелинейности системы. Для их

* Работа выполнена при поддержке Научно-образовательного центра «Газпром-нефть-НГУ».

© Шукало В. И., 2025

решения был применен метод Андерсона [3], который улучшает сходимость за счет использования линейной комбинации предыдущих итераций и минимизации ошибки методом наименьших квадратов. Численные эксперименты показали, что этот подход позволяет сократить время расчета до 50 %, значительно повышая эффективность модели. Полученные результаты могут быть адаптированы для других симуляторов благодаря схожести их архитектуры.

Список литературы

1. Siebrits, E., Peirce, A. An efficient multi-layer planar 3D fracture growth algorithm using a fixed mesh approach // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2002. Vol. 53, No. 3. P. 691–717.
2. Zia, H., Lecampion, B. PyFrac: A planar 3D hydraulic fracture simulator // Computer Physics Communications. 2020. Vol. 255. Article ID 107256.
3. Anderson, D.G. Iterative procedures for nonlinear integral equations // J. of the ACM. 1965. Vol. 12, No. 4. P. 547–560.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Абдуллин Р. Ф.	132	Горбушин А. Р.	69	Кутьин М. С.	31
Абрамов М. А.	5	Гуськов О. В.	12	Лаврук С. А.	80
Алпацкий Н. С.	3	Демиденко Н. В.	42	Лебедев А. С.	91
Антонов Д. В.	159	Дик Д. В.	26, 45	Леонова Э. И.	82
Арефьев К. Ю.	5	Довыденко О. В.	47, 165	Линдеров М. Л.	83
Архипов В. А.	6	Дулин В. М.	55, 124	Лопато А. И.	86
Афанасенков А. А.	8	Дьячков С. А.	114	Лузгин Н. К.	89
Бабинцев А. С.	10	Ерманюк Е. В.	50, 175	Лукьянов А. А.	91
Бабушенко Д. И.	12	Ерофеев Е. В.	52	Майер А. Е.	14
Баймова Ю. А.	122	Зайцев А. М.	53	Майор И. А.	93
Байкин А. Н.	132	Занин Б. Ю.	3	Маликов А. Г.	35
Барков С. О.	168	Запрягаев В. И.	106	Малыгина К. Д.	129
Барсуков А. Р.	63	Зотьева А. А.	55	Маняхин И. А.	63
Безбородова П. А.	14	Иванов А. В.	20, 170	Маркин В. В.	18, 95
Белова О. В.	101	Иванова А. А.	57	Маслов М. Г.	97, 99
Белоусова Н. С.	16	Игрушкин С. И.	77, 97, 99	Маширов А. В.	59, 71, 101
Беркон Г. А.	18	Кавун И. Н.	106	Медведев А. Е.	40
Бессонов П. С.	10	Казанин И. В.	95	Мельников А. Ю.	104
Богданов С.	6	Калинин С. А.	132	Меньщикова И. В.	106
Бойко А. В.	20, 42, 163, 170	Каманцев А. П.	59	Мерсон Д. Л.	83
Борискин А. А.	22	Карев В. И.	168	Мизёв А. И.	108
Бородулин В. И.	20, 170	Кармушин С. Р.	61	Митрофанов А. А.	110
Бузмаков М. Д.	24	Карпов Д. И.	134	Мищенко Д. А.	20, 170
Бурхинова Н. Ю.	26, 32, 45	Карра Ж.-Б.	63	Моисеева К. М.	110
Васильев А. А.	22	Квас А. Т.	65	Моралев И. А.	73
Васнёв И. Р.	28	Кириловский С. В.	20	Мурсенкова И. В.	57
Виленский О. Ю.	31	Кисловский В. А.	67	Назаров Н. А.	65
Витошкин И. Е.	32	Коваленко Ю. Ф.	168	Неженцев А. В.	126
Вишняков О. И.	172	Козик А. Е.	69	Некрасова А. А.	112, 141
Власова О. А.	33	Коледов В. В.	59, 71, 126	Нимаков А. Н.	114
Гантман М. Ю.	97, 99	Колесов К. А.	71, 101	Ничик М. Ю.	55
Гембаржевский Г. В.	155	Копейкин Р. Р.	132	Носов Ю. О.	116
Герцель И. С.	35	Коробейников С. М.	134	Остапчук А. А.	118
Гибанов Н. С.	37	Котвицкий А. Я.	73	Павленко А. М.	3
Глотов О. Г.	16	Красников В. С.	14	Пантелеев И. А.	120
Головин С. В.	132	Красняков И. В.	24	Паршин Д. В.	149
Голых Р. Н.	63	Кудряшова С. А.	75	Первухин К. Е.	161
Гольшев А. А.	32, 39	Кузнецов А. С.	71	Поливанов П. А.	18, 95, 172
Гольщева П. С.	40	Куликов Д. А.	77	Полякова П. В.	122
		Курилов В. Б.	79		

Поплавская Т. В.	20	Станкевич Ю. А.	149	Филиппов А. А.	26, 45, 161
Попов Я. Е.	124	Стеблинкин А. И.	52	Харюшина М. М.	163
Прокунин А. В.	126	Стрижак П. А.	159	Хижняк С. Ю.	165
Путилова Е. А.	129	Сухова М. Р.	161	Химуля В. В.	168
Рашковский С. А.	155	Талисов Е. Е.	77	Хмель Т. А.	8
Ридель А. В.	134	Темербеков В. М.	145	Хмельёв В. Н.	63
Рублев Г. Д.	131, 114	Тимофеева А. Д.	147	Хребтов М. Ю.	124
Рябцов А. В.	31	Тихвинский Д. В.	149	Цветков М. И.	161
Саввинов А. Е.	132	Тлеуленов Р. Р.	151	Черепанов А. Д.	170
Савенко Р. А.	134	Токарев М. П.	112, 141	Чуднова В. Д.	47
Садовский И. А.	136	Токарь В. Л.	10	Чутков Д. С.	149
Самойленко А. И.	47, 165	Тропин Д. А.	145, 153	Шихова М. А.	172
Сибин А. Н.	132	Усанина А. С.	6	Шмаков А. С.	69
Сиваков Н. С.	155	Усанов В. А.	155	Шмакова Н. Д.	75, 143, 175
Сидоренко А. А.	89	Устинов М. В.	73	Шмелев Е. И.	99
Сидоров Р. С.	12	Уткин П. С.	86	Шукало В. И.	178
Смирнова Н. С.	139	Уткина Т. В.	97, 99	Ядренкин М. А.	69
Сорокин И. В.	16	Феденюк В. А.	157	Якуш С. Е.	155
Сорокин М. И.	112, 141	Федоренко Р. М.	159		
Спицына А. А.	143	Федорова Н. Н.	28		

СОДЕРЖАНИЕ

Алпацкий Н. С., Павленко А. М., Занин Б. Ю. Влияние турбулентного следа на крыло со стреловидной передней кромкой при критическом угле атаки.....	3
Арефьев К. Ю., Абрамов М. А. Математическая модель испарения полидисперсных капель воды в потоке воздуха при скоростной и температурной неравновесности.....	5
Архипов В. А., С. Богданов, Усанина А. С. Динамика бидисперсного пузырькового кластера при наличии поверхностно-активного вещества	6
Афанасенков А. А., Хмель Т. А. Численное моделирование процессов гибридной детонации водород-воздушной смеси при наличии слоев частиц алюминия	8
Бабинцев А. С., Бессонов П. С., Токарь В. Л. Усовершенствованный метод определения усталостных характеристик трещиностойкости полимерных композиционных материалов по моде сдвига.....	10
Бабушенко Д. И., Гуськов О. В., Сидоров Р. С. Численное моделирование эксперимента по непрерывному детонационному горению водородо-воздушной смеси в кольцевой камере цилиндрической геометрии	12
Безбородова П. А., Красников В. С., Майер А. Е. Влияние атомов водорода на пластичность Al-Cu-сплава при высоких скоростях деформации: многомасштабный подход	14
Белоусова Н. С., Глотов О. Г., Сорокин И. В. Характеристики горения смесевых композиций с титаном	16
Беркон Г. А., Поливанов П. А., Маркин В. В. Моделирование атмосферной турбулентности в мультивентиляторном стенде.....	18
Бойко А. В., Бородулин В. И., Иванов А. В., Кириловский С. В., Мищенко Д. А., Поплавская Т. В. Управление переходом к турбулентности в трехмерном пограничном слое с помощью рельефа поверхности	20
Борискин А. А., Васильев А. А. Нестационарные режимы при двумерной дифракции волн горения и детонации в двухтопливных смесях	22
Бузмаков М. Д., Красняков И. В. Математическое моделирование процессов переупаковки клеток при одноосном растяжении ткани в эпителиальных листах.....	24

Бурхинова Н. Ю., Дик Д. В., Филиппов А. А. Исследование структуры и физико-механических свойств керамики на основе карбида бора с добавлением диборида ванадия.....	26
Васнёв И. Р., Федорова Н. Н. Влияние мощности теплового источника на структуру высокоскоростного течения в канале и тепловые потоки в его стенки	28
Виленский О. Ю., Кутьин М. С., Рябцов А. В. Расчетные исследования динамической прочности ТВС-реакторов типа БН.....	31
Витошкин И. Е., Гольшев А. А., Бурхинова Н. Ю. Применение аддитивных технологий для оборудования горнодобывающей промышленности.....	32
Власова О. А. Экспериментальное исследование всплытия легкой сферы во вращающемся столбе жидкости конечной длины	33
Герцель И. С., Маликов А. Г. Исследование фазового состава титаноматричного композитного материала, полученного методом прямого лазерного выращивания	35
Гибанов Н. С. Численное моделирование сопряженной смешанной конвекции в канале с нагревательными элементами и реберной системой охлаждения.....	37
Гольшев А. А. Влияние типа газовой среды на процессы формирования ванны расплава при лазерном воздействии.....	39
Гольшева П. С., Медведев А. Е. Математическое моделирование дыхания человека.....	40
Демиденко Н. В., Бойко А. В. Новый метод сортировки мод неустойчивости	42
Дик Д. В., Бурхинова Н. Ю., Филиппов А. А. Градиент микроструктуры керамики B_4C-CrV_2	45
Довыденко О. В., Самойленко А. И., Чуднова В. Д. Эталонные меры координат центра масс и моментов инерции	47
Ерманюк Е. В. Аттракторы внутренних и инерционных волн: волновая турбулентность в замкнутых областях.....	50
Ерофеев Е. В., Стеблинкин А. И. Моделирование физических процессов пассивного демпфирования рулевого гидроагрегата	52
Зайцев А. М. Расчет устойчивости подкрепленных панелей из полимерных композиционных материалов при сжатии с учетом эффекта сдвиговой задержки.....	53
Зотьева А. А., Ничик М. Ю., Дулин В. М. Отладка двухцветного ПЛИФ-метода на двух несмешивающихся жидкостях	55

Иванова А. А., Мурсенкова И. В. Экспериментальное исследование ударно-волновой конфигурации с локальными вихрями в плазменной области.....	57
Каманцев А. П., Маширов А. В., Коледов В. В. Магнитные функциональные материалы для микромеханики на основе сплавов Гейслера семейства NI-MN-Z (Z = GA, IN, SN)	59
Кармушин С. Р. Нестационарные течения вязкоупругой жидкости в нелинейных гиперболических моделях	61
Карра Ж.-Б., Голых Р. Н., Маняхин И. А., Барсуков А. Р., Хмельёв В. Н. Влияние вязкости и температуры на формирование поверхностных волн аэрационного пузырька при ультразвуковом воздействии	63
Квас А. Т., Назаров Н. А. Разработка методов искусственного интеллекта для анализа PIV-экспериментов	65
Кисловский В. А. Влияние выдува газовой струи на сверхзвуковое поперечное обтекание цилиндрического тела	67
Козик А. Е., Горбушин А. Р., Шмаков А. С., Ядренкин М. А. Исследование влияния локального МГД-взаимодействия на лобовое сопротивление модели с помощью тензометрических весов	69
Колесов К. А., Кузнецов А. С., Коледов В. В., Маширов А. В. Влияние усилия прижатия в механическом контакте GdNi ₂ — медь на процесс теплопередачи	71
Котвицкий А. Я., Моралев И. А., Устинов М. В. Моделирование подавления нестационарных вихрей неустойчивости поперечного течения в пограничном слое.....	73
Кудряшова С. А., Шмакова Н. Д. Фокусировка внутренних волн горизонтальными колебаниями сегмента тороида: среднее течение.....	75
Куликов Д. А., Талисов Е. Е., Игрушкин С. И. Особенности анализа вибрационных характеристик оборудования ЯЭУ на объектах использования.....	77
Курилов В. Б. Исследования адаптивной механизации задней кромки крыла магистрального самолета	79
Лаврук С. А. Верификация и валидация модели детонационного горения частиц алюминия	80
Леонова Э. И. Численное решение задачи равновесия волокнистого композита, армированного криволинейными включениями.....	82
Линдеров М. Л., Мерсон Д. Л. Энергия и медианная частота акустической эмиссии как индикаторы переходных процессов в материалах	83

Лопато А. И., Уткин П. С. Математическое моделирование отрыва частицы от шероховатой поверхности с разрешением частиц.....	86
Лузгин Н. К., Сидоренко А. А. Метод обработки данных поверхностной визуализации в аэродинамическом эксперименте	89
Лукьянов А. А., Лебедев А. С. Зависимость турбулентных характеристик потока от угла наклона сквозных отверстий в цилиндре.....	91
Майор И. А., Казанин И. В. Моделирование процессов газоразделения водородно-гелиевых смесей мембранно-сорбционным методом.....	93
Маркин В. В., Поливанов П. А. Влияние продольных вихрей на отрыв турбулентного пограничного слоя за обратным уступом.....	95
Маслов М. Г., Игрушкин С. И., Гантман М. Ю., Уткина Т. В. Исследование нестационарных процессов в прямоугольной каверне	97
Маслов М. Г., Игрушкин С. И., Гантман М. Ю., Уткина Т. В., Шмелев Е. И. Результаты расчетно-экспериментальных исследований по применению резонаторов Гельмгольца для устранения акустических резонансов полости в трубопроводных системах	99
Маширов А. В., Колесов К. А., Белова О. В. Механический тепловой ключ для единичного каскада криогенного магнитного рефрижератора	101
Мельников А. Ю. Экспериментальное исследование сверхзвуковых течений с трением в каналах постоянного сечения.....	104
Меньщикова И. В., Запрягаев В. И., Кавун И. Н. Взаимодействие струи с поверхностью клина при сверхзвуковой скорости потока.....	106
Мизёв А. И. Динамика адсорбированных слоев поверхностно-активных веществ в гидродинамических системах.....	108
Митрофанов А. А., Моисеева К. М. Исследование скорости горения газозвеси порошка алюминия при наличии лучистого теплопереноса.....	110
Некрасова А. А., Сорокин М. И., Токарев М. П. Разработка алгоритма оценки перемешивания в свободной турбулентной струе с использованием сверточных нейронных сетей.....	112
Нимаков А. Н., Рублев Г. Д., Дьячков С. А. Сопряжение методов гидродинамики сглаженных частиц и конечного объема	114

Носов Ю. О. Описание математических моделей вязкоупругого и вязкоупругопластического поведения пастообразных смазочных материалов в рамках механики деформируемого твердого тела	116
Остапчук А. А. Формирование сильнейших землетрясений: от трещины до мегаразрыва	118
Пантелеев И. А. Модель деформирования трещиновато-пористого дилатирующего материала: верификация и геофизические приложения	120
Полякова П. В., Баимова Ю. А. Механические свойства композита никель/диамант: молекулярная динамика	122
Попов Я. Е., Хребтов М. Ю., Дулин В. М. Разработка оптической системы анализа деформаций поверхности тел по нанесенным маркерам	124
Прокунин А. В., Коледов В. В., Неженцев А. В. Применение сплавов с эффектом памяти формы для манипулирования объектами на микро- и наноуровне	126
Путилова Е. А., Малыгина К. Д. Применение магнитной структуроскопии для диагностики изменения состояния современных материалов	129
Рублев Г. Д. Моделирование осесимметричных течений контактным методом SPH	131
Саввинов А. Е., Сибин А. Н., Абдуллин Р. Ф., Байкин А. Н., Головин С. В., Калинин С. А., Копейкин Р. Р. Математическая модель авто-ГРП с разделением по физическим процессам	132
Савенко Р. А., Карпов Д. И., Ридель А. В., Коробейников С. М. Моделирование газового разряда в пузырьке гелия в жидком диэлектрике	134
Садовский И. А. Экспериментальное исследование влияния распределенного воздействия на устойчивость возмущений в пограничном слое Блазиуса	136
Смирнова Н. С. Алгоритм адаптации расчетной сетки в задачах внешнего обтекания	139
Сорокин М. И., Некрасова А. А., Токарев М. П. Исследование влияния периодических возмущений на динамику крупных вихрей для круглого и прямоугольного сопел	141
Спицына А. А., Шмакова Н. Д. Квазидвумерное течение пены в ячейке Хеле-Шоу при наличии длинного препятствия	143
Темербеков В. М., Тропин Д. А. Численное моделирование распространения детонационной волны в плоском канале с прямоугольными препятствиями	145

Тимофеева А. Д. Исследование проблем одновременной работы электрогидравлических приводов.....	147
Тихвинский Д. В., Станкевич Ю. А., Чутков Д. С., Паршин Д. В. Динамика церебральной ангиоархитектоники при наличии стрессового фактора	149
Тлеуленов Р. Р. Учет лучистого теплообмена при исследовании скорости горения газозвеси угольной пыли.....	151
Тропин Д. А. Управление детонационными процессами в смесях реагирующих газов добавками инертных компонент	153
Усанов В. А., Гембаржевский Г. В., Рашковский С. А., Сиваков Н. С., Якуш С. Е. Исследование процессов плавления и горения парафина при взаимодействии с потоком горячего воздуха.....	155
Феденюк В. А. Исследование статических и динамических характеристик рулевого привода при ускоренном воспроизведении процессов износа.....	157
Федоренко Р. М., Антонов Д. В., Стрижак П. А. Микровзрывная фрагментация свободнопадающих двухжидкостных капель при микроволновом нагреве	159
Филиппов А. А., Цветков М. И., Первухин К. Е., Сухова М. Р. Разработка методики механических испытаний протезов нижних конечностей из углепластиковых композитов	161
Харюшина М. М., Бойко А. В. Влияние непараллельности линий тока на развитие линейных возмущений в отрыве за обратной ступенькой.....	163
Хижняк С. Ю., Довыденко О. В., Самойленко А. И. Стандарт организации СТО СМК 7-156-2023 «Аэродинамические трубы малых дозвуковых скоростей. Типовая методика измерений скорости воздушного потока»	165
Химуля В. В., Коваленко Ю. Ф., Карев В. И., Барков С. О. Комплексное исследование механических и фильтрационных свойств коллектора газоконденсатного месторождения для определения параметров безопасной и эффективной эксплуатации скважин.....	168
Черепанов А. Д., Бойко А. В., Бородулин В. И., Иванов А. В., Мищенко Д. А. Специфика трансформации вихрей неустойчивости поперечного течения на стреловидном крыле.....	170
Шихова М. А., Вишняков О. И., Поливанов П. А. Динамическая калибровка пленочных термоанемометрических датчиков в ударной трубе	172

Шмакова Н. Д., Ерманюк Е. В. Исследование нелинейных режимов инерционных волн при наличии наклонной стенки	175
Шукало В. И. Методы ускорения расчета гидроразрыва пласта.....	178
Алфавитный указатель авторов	180

Научное издание

**ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ:
ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Тезисы докладов XIX Всероссийской
школы-конференции молодых ученых

10–17 марта 2025 г., Новосибирск — Шерегеш

Подготовка к печати *С. В. Исаковой, Е. В. Неклюдовой, А. С. Терешкиной*
Верстка *А. С. Терешкиной*

Подписано в печать 02.03.2025.
Формат бумаги 60 × 84/16. Усл. печ. л. 11,75. Уч.-изд. л. 10,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 43.

Издательско-полиграфический центр НГУ
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.



N* Новосибирский
государственный
университет
*НАСТОЯЩАЯ НАУКА

Генеральный спонсор



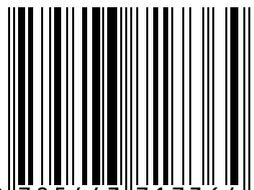
FlowVision

Спонсоры



NEWTONS

ISBN 978-5-4437-1736-4



9 785443 717364