

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

г. Сочи, "Сочи Парк Отель"
6-13 сентября 2026 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Министерство науки и высшего образования РФ
Сибирское отделение Российской академии наук
Национальный комитет по тепломассообмену РАН

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
Новосибирский государственный университет
Новосибирский государственный технический университет

Научный центр мирового уровня
"Теплофизика и энергетика"
ООО "ТЕСИС"



НКТМ
РАН



XI Всероссийская научная конференция
«Теплофизика и физическая гидродинамика»
проводится при поддержке
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
в рамках Соглашения № 075-15-2025-007,
Научного центра мирового уровня "Теплофизика и энергетика"
в рамках Соглашения № 075-15-2025-572
и ООО "ТЕСИС"

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирское отделение Российской академии наук
Национальный комитет по тепломассообмену

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
Новосибирский государственный университет
Новосибирский государственный технический университет

XI Всероссийская научная конференция

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

Сочи
«Сочи Парк Отель»
6–13 сентября 2026 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Новосибирск 2026

Сборник содержит тезисы докладов XI Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ2026). Конференция является продолжением серии всесоюзных конференций молодых исследователей, проводимых при участии Института теплофизики СО РАН с 70-х годов XX века. В этом году конференция проходит в г. Сочи. Организаторами конференции выступают Сибирское отделение Российской академии наук, Национальный комитет по тепломассообмену РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирский государственный университет, Новосибирский государственный технический университет. Целью конференции является обсуждение современных задач в области теплофизики и гидрогазодинамики, поиск путей их решения, а также подготовка научного кадрового резерва высокой квалификации и привлечение молодых ученых к наиболее актуальным исследованиям. В сборник включены тезисы докладов по следующим направлениям: теплообмен и гидродинамика в однофазных средах; гидродинамика и тепломассообмен в многофазных системах; фазовые переходы; научные основы нефтегазовых технологий; гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы; численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике; методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента; теплофизические свойства веществ и новые материалы; тепломассообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах; электрофизические явления в газовых и жидких средах; теплообмен и гидродинамика в технологических процессах и защита окружающей среды. Материалы, представленные в сборнике, могут быть полезны студентам вузов, аспирантам и научным сотрудникам соответствующих специальностей.

Председатель

Маркович Д.М., академик РАН

Заместитель

Головин С.В., профессор РАН, д.ф.-м.н.

Марчук И.В., профессор РАН, д.ф.-м.н.

Учёный секретарь

Макаров М.С., к.ф.-м.н.

Технический комитет

Зорькина А.И.

Лукьянов Ал.А.

Лукьянов Ан.А.

Сластная Д.А.

Технический соорганизатор

ИП Тырышкина Е.С.

Научный комитет

Алексеев С.В., академик РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Алхасов А.Б., профессор, д.т.н. (ИПГВЭ - филиал ОИВТ РАН в г. Махачкале, Махачкала)

Батаев А.А., профессор, д.т.н. (НГТУ, Новосибирск)

Васильев А.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Губайдуллин А.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИТПМ СО РАН, Тюмень)

Дектерев А.А., к.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Елистратов С.Л., доцент, д.т.н. (НГТУ, Новосибирск)

Ерманюк Е.В., д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Исаев С.А., профессор, д.ф.-м.н. (СПбГУГА, Санкт-Петербург)

Кабов О.А., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Корогаев Г.К., чл.-корр. РАН (МГИ РАН, Севастополь)

Кубряков А.И., д.ф.-м.н. (МГИ РАН, Севастополь)

Кузнецов В.В., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Куйбин П.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Куперштох А.Л., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Левин А.А., д.т.н. (ИСЭМ СО РАН, Иркутск)

Лукашов В.В., к.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Мильман О.О., профессор, д.т.н. (НПВП Турбокон, Калуга)

Наумов И.В., профессор РАН, д.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Ненарокомов А.В., профессор, д.т.н., (МАИ, Москва)

Павленко А.Н., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Прибатурин Н.А., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Прууэл Э.Р., д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Пухначёв В.В., чл.-корр. РАН (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Рабаданов М.Х., д.ф.-м.н. (ИПГВЭ - филиал ОИВТ РАН в г. Махачкале, Махачкала)

Рыжков А.Ф., профессор, д.т.н. (УрФУ, Екатеринбург)

Сажин С.С., PhD, Prof. (University of Brighton, UK)

Смовж Д.В., к.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Соловьев С.Л., д.т.н. (АО «ГНЦ ТРИНИТИ», Москва)

Станкус С.В., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Терехов В.И., профессор, д.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Терехов В.В., профессор РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Токарев М.П., к.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Федорук М.П., академик РАН (НГУ, Новосибирск)

Фрик П.Г., профессор, д.ф.-м.н. (ИМСС, Пермь)

Хабахпашев Г.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Цвелодуб О.Ю., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Черданцев А.В., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Чернов А.А., профессор РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Шарыпов О.В., чл.-корр. РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Яворский Н.И., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Издание сборника докладов производилось с авторских листов участников конференции.

За ошибки и опечатки авторов издательство ответственности не несёт.

ПЛЕНАРНЫЕ ЛЕКЦИИ



ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОМАСООБМЕНА ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ В КАНАЛАХ МАЛОГО РАЗМЕРА

Кузнецов В.В.

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

Перспективным направлением развития энергетических установок является применение каналов малого размера, позволяющих значительно повысить энергоэффективность за счет увеличения удельной поверхности и интенсификации процессов тепло- и массообмена. Отсутствие надежных методов расчета в данных условиях обусловлено слабой изученностью взаимосвязи процессов на микро- и макромасштабе в условиях определяющего влияния капиллярных сил [1]. В данной работе рассмотрено многомасштабное физическое и математическое моделирование гидродинамики и тепломассообмена в теплообменниках энергетических установок, в которых применены каналы малого размера для реализации ранее недоступных технологий.

Рассмотрены методы моделирования процессов тепломассообмена при испарении и конденсации в каналах пластинчато-ребристых теплообменников систем сжижения природного газа и криогенной техники. Разработана математическая модель, основанная на сшивке решений для течения жидкости в углах и на стенках каналов в условиях доминирующего влияния капиллярных сил. В данных условиях конфигурация пленки жидкости отличается для испарения и конденсации, что обуславливает различие в коэффициентах теплоотдачи. Расчеты показали, что формирование сухих пятен и увеличение коэффициента теплоотдачи вблизи контактной линии типичны для испарения жидкости в малоразмерных каналах, но их влияние ограничено величиной теплового потока. Предложенная модель тепломассообмена для малых тепловых потоков хорошо согласуется с экспериментальными данными и закладывает основы для расчета компактных испарителей и конденсаторов.

Рассмотрены особенности моделирования процессов тепломассообмена при противоточном газожидкостном течении в структурных насадках воздухоразделительных установок с малоразмерными каналами сложной формы. Развита метод расчета межфазного тепло- и массообмена в данных условиях, основанный на учете самопроизвольной закрутки потока пара, вызванной взаимодействием потоков в слое смешения. Установлено, что основной причиной крупномасштабной неустойчивости в воздухоразделительных установках, снижающих их энергоэффективность, являются взаимосвязанные гидродинамические и массообменные процессы, приводящие к развитию конвективных течений и капиллярно-гравитационной неустойчивости, что снижает эффективность разделения.

Для обоснования микроканальных систем отвода тепла от теплонапряженных зон энергетического оборудования и микропроцессоров разработан новый метод расчета теплообмена при кипении жидкости в каналах малого размера и микроструйных системах,

учитывающий совместно вклад подавления пузырькового кипения, двухфазной конвекции и испарения тонкой пленки жидкости в неравновесных условиях. Установлены физические механизмы и предложены методы повышения критической тепловой нагрузки для кипения воды, диэлектрической жидкости и хладонов в микроканальных системах охлаждения, выявлены закономерности теплообмена при микроструйном охлаждении областей повышенного тепловыделения. Установлено влияние поперечного размера микроструй, их расположения и скорости жидкости на теплообмен и критический тепловой поток для натекающего затопленного струй на теплонапряженную поверхность. Обоснованы методы повышения критической тепловой нагрузки для недогретого кипения в микроканальных и микроструйных системах охлаждения, проведено сравнение эффективности теплообмена при микроканальном и микроструйном охлаждении.

Рассмотрены особенности взрывного кипения метастабильной жидкости на микронагревателе при импульсном тепловом воздействии, направленные на обоснование МЭМС на основе управляемого распада жидкости. С использованием оригинальной оптической методики установлены характеристики пузырькового распада широкого класса жидкостей и смесевых композиций при скорости роста температуры до 1ГК/с, разработан метод расчета самосогласованного зародышеобразования и роста паровых пузырей в наведенном ими поле давления с учетом неоднородности поля температуры и неравновесности фазового перехода. Приведены результаты экспериментального и численного исследования взрывного кипения на наноструктурированном нагревателе, установлены условия перехода к спинодальному распаду однокомпонентных и бинарных систем, разработаны методы управления взрывным фазовым переходом в микро-размерных системах.

Обсуждено применение полученных результатов для повышения эффективности теплообменного оборудования систем сжижения природного газа, криогенных разделительных установок, систем охлаждения теплонапряженного оборудования в микроэлектронике и атомной энергетике, МЭМС на основе управляемого распада метастабильной жидкости.

Список литературы:

1. Kuznetsov V.V. Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // Proceedings of the International Heat Transfer Conference IHTC14. 2010. Washington, USA. Keynote IHTC14-22570.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2025-572.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Лисовенко Д.С.¹, Епишин А.И.²¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
просп. Вернадского 101-1, Москва, 119526, Россия² Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова РАН,
ул. Ак. Осипяна 8, Черноголовка, 142432, Россия

Лопатки горячего тракта газотурбинных двигателей работают при высоких температурах (до 1100-1150°C) в очень тяжелых эксплуатационных условиях, которые включают различного типа термомеханические нагрузки и коррозионное воздействие продуктов горения топлива. Поэтому такие турбинные лопатки изготавливают из жаропрочных коррозионно-стойких никелевых сплавов новых поколений, применяя самые современные технологии. Для повышения конструкционной прочности лопаток их направленно кристаллизуют в виде «технических монокристаллов», в которых отсутствуют большеугловые границы, по которым происходит окисление и межзеренное разрушение.

На примере жаропрочных никелевых сплавов рассмотрено аналитическое решение для остаточных напряжений и их энергии в упруго анизотропной двухкомпонентной пластинчатой структуре, где компоненты имеют идентичный тип упругой анизотропии, одинаковые или пропорциональные упругие константы и совпадающие главные оси упругой анизотропии [1]. Показано, что сильная анизотропия упругой энергии стабилизирует низкоэнергетическую (001) ориентацию рафт-структуры [001] монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов.

Предложена комплексная модель аннигиляции пор в процессе горячего изостатического прессования, учитывающая одновременное действие механизмов пластического течения материала и диффузионного растворения пор вследствие эмиссии вакансий поверхностью поры [2]. Полученные математические уравнения применены для анализа кинетики аннигиляции пор в монокристаллах никелевого жаропрочного сплава CMSX-4 в процессе ГИПа, применяемого к этому сплаву в промышленности. Из проведенного анализа следует, что в данных условиях оба механизма (пластического течения и диффузии вакансий) вносят сопоставимый вклад в сокращение объема пор. С повышением давления ГИПа вклад пластического течения увеличивается, тогда как вклад диффузии вакансий понижается.

Методом спекл-интерферометрии исследованы упругие свойства монокристаллического никелевого жаропрочного сплава 2-го поколения, проявляющего аусетические механические свойства [3]. Данное явление наблюдали для обоих сплавов при температурах 980-1000 °C и низких либо нулевых напряжениях нагрузки.

Исследована отрицательная ползучесть монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов SRR99 и CMSX-4 [4]. Предположено, что основной причиной отрицательной ползучести является образование ближнего порядка атомов в сильно легированной кристаллической решетке матричной γ -фазы. Дополнительными факторами, влияющими на величину и анизотропию деформации отрицательной ползучести, могут быть релаксация остаточных напряжений: на микроскопическом уровне – мисфитных напряжений между γ -матрицей и упрочняющими ее γ' -выделениями, и на мезоскопическом уровне – дендритных напряжений между осями дендритов и межосевыми пространствами.

Исходя из экспериментальных значений адиабатических упругих жесткостей монокристаллов никелевого жаропрочного сплава CMSX-4 рассчитаны изотермические упругие характеристики этого сплава для широкого интервала температур – от комнатной до 1300 °C [5].

Список литературы:

1. Лисовенко Д.С., Епишин А.И. Анизотропия энергии остаточных напряжений в двухкомпонентных пластинчатых кристаллических структурах. Известия РАН. МТТ. 2023. № 6. С. 136-154.
2. Епишин А.И., Лисовенко Д.С. Моделирование процесса горячего изостатического прессования монокристаллов никелевого жаропрочного сплава с учетом пластического течения и диффузии вакансий. Известия РАН. МТТ. 2025, № 3. С. 38-58.
3. Епишин А.И., Одинцев И.Н., Лисовенко Д.С., Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Измерение упругих характеристик монокристаллов никелевого жаропрочного сплава методом спекл-интерферометрии. Известия. РАН. МТТ. 2024, № 6. С. 187-204.
4. Епишин А.И., Лисовенко Д.С. Отрицательная ползучесть монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов. Известия РАН. МТТ. 2024, № 3. С. 136-154.
5. Epishin A.I., Lisovenko D.S. Comparison of isothermal and adiabatic elasticity characteristics of the single crystal nickel-based superalloy CMSX-4 in the temperature range between room temperature and 1300 C. Mechanics of Solids. 2023. V.58. N 5. P.1587-1598.

*Работа выполнена по темам
Госзаданий ИПМех РАН
(номер госрегистрации 124013000674-0) и
ИСМАН РАН (номер госрегистрации
FFSZ-2025-0003)*

ТЕПЛООБМЕН И ТРЕНИЕ В КАНАЛАХ С САМООРГАНИЗУЮЩИМИСЯ ВТОРИЧНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ

Михеев Н.И.

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

Наличие турбулентных пульсаций в некруглых прямых трубах приводит к появлению в осредненном поле скорости поперечных компонент, образующих вторичное течение. Это гидродинамическое явление было обнаружено Прандтлем и Никурадзе еще в 20-е годы прошлого века. Позже было установлено, что самоорганизующиеся вторичные течения возникают не только при обтекании внутренних и внешних углов каналов, но и при обтекании полос шероховатости. В конечном счете причиной вторичных течений является неравномерность поля давления в поперечном сечении канала, инициированная неравномерностью генерации турбулентности по сечению.

В докладе отражены результаты исследования вторичных течений в градиентных и пульсирующих потоках в каналах. В рамках тезисов кратко изложены только не опубликованные ранее результаты исследований гидродинамических и тепловых процессов в канале прямоугольного сечения с чередующимися продольными полосами гладкой и дискретно шероховатой стенки, расположенными на широких стенках канала. Сложность исследования кинематической структуры вторичных течений обусловлена относительной малостью усредненных поперечных компонент скорости. Разрешение оптического метода измерений SIV [1] оказалось вполне достаточным для такой задачи. Получена полная информация о поле турбулентности в канале, о распределении генерации турбулентности по сечению канала, а также о коэффициентах гидравлического сопротивления и теплоотдачи в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Установлено, что генерация турбулентности сосредоточена в пристеночной области, в основном над полосой шероховатости, где она в 5...6 раз больше, чем над гладкой полосой. Это и является первопричиной формирования вторичного течения, в пристеночной области направленного от полос шероховатости к гладким полосам. Наибольшая интенсивность вторичного течения достигается при числах Рейнольдса $1...2 \times 10^4$: осредненная поперечная скорость достигает 4% от средней скорости в канале. С увеличением Re относительная поперечная скорость плавно уменьшается.

Наибольший коэффициент теплогидравлической эффективности получен для случая с нанесением полос шероховатости только на одну широкую стенку плоского канала. Такой вариант канала интересен для некоторых схем систем охлаждения, когда интенсифицировать теплоотдачу нужно только со стороны одной из стенок канала. При полосах шероховатости на обеих широких сторонах канала лучшая эффективность получена при относительном шаге выступов в полосе $s/h=10$. Наибольший коэффициент эффективности достигается при $Re=4000$. Однако в этой области чисел Рейнольдса еще нет развитой турбулентности. При развитой турбулентности (число Рейнольдса порядка 10^4) прирост эффективности по отношению к гладкому каналу для исследованных конфигураций

тоже очень высок – от 50 до 70 % (коэффициент эффективности 1,5...1,7). При $Re > 10^4$ коэффициент эффективности монотонно снижается, но даже при $Re=10^5$ имеет еще весьма высокое значение 1,25...1,45.

В заключительной части доклада обсуждаются механизмы влияния вторичных течений на процессы переноса. В дополнение к структуре потока и турбулентности важную информацию дают нам результаты тепловизионных измерений, на основе которых была получена информация о локальном коэффициенте теплоотдачи и локальной температуре теплообменной поверхности канала. Как и следовало ожидать, минимум локальной теплоотдачи соответствует центру гладкой полосы, но удивительно то, что этот минимум лишь менее чем на 10% ниже среднего уровня. В условиях подвода теплоты в опытах по закону $q=\text{const}$ между полосой шероховатости и гладкой полосой создается разность температур около 10% от температурного напора. Сформированное вторичное течение в пристеночной области направлено поперек полос шероховатости, что с учетом разности температур гладкой и шероховатой полос влечет формирование нового теплового пограничного слоя на гладкой полосе. Как известно, на начальном участке теплового пограничного слоя существенно интенсифицируется теплоотдача, что выравнивает теплоотдачу по всей поверхности теплообмена. При этом условий для формирования нового динамического пограничного слоя не возникает. Само же искривление осредненных линий тока при относительной скорости вторичного течения всего лишь до 4% сравнительно невелико, поэтому и прирост сопротивления по сравнению с гипотетическим случаем отсутствия вторичных течений сравнительно невелик. С учетом отмеченных выше процессов крупномасштабная циркуляция теплоносителя, вызванная самоорганизующимся вторичным течением в канале с полосами шероховатости, в большей степени интенсифицирует теплоотдачу, чем увеличивает мощность на прокачку теплоносителя через канал с полосами шероховатости.

Установлено, что при создании условий для формирования вторичных течений в канале можно существенно повысить теплогидравлическую эффективность теплообменников и систем охлаждения тепловых машин, тем самым улучшить показатели их экономичности. Положительный эффект превзошел результаты для других видов структуры дискретной шероховатости и открывает новые возможности повышения теплогидравлической эффективности теплообменников и систем охлаждения.

Список литературы:

1. Mikhееv, N.I., Dushin, N.S. A method for measuring the dynamics of velocity vector fields in a turbulent flow using smoke image-visualization videos. Instrum Exp Tech 59, 882–889 (2016).

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-19-00507-П*

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ НАГРЕВА
И ИСПАРЕНИЯ ЖИДКИХ ПЛЕНОК****Сажин С.С.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Будет представлен обзор ранее опубликованных и неопубликованных результатов по разработке модели нагрева и испарения многокомпонентной жидкой пленки. Модель нагрева и испарения многокомпонентной жидкой пленки, основанная на аналитических решениях уравнений теплопередачи и диффузии компонентов внутри этой пленки, была предложена в [1]. Для уравнения теплопередачи использовалось граничное условие Дирихле на твердой поверхности, а граничное условие Робина — на внешней поверхности пленки. Для уравнений компонентной диффузии использовались граничные условия Неймана на твердой поверхности, а граничные условия Робина — на внешней поверхности пленки [2]. Эта модель была обобщена в работе [3] для рассмотрения вклада теплового потока от твердой поверхности, используя граничное условие Неймана для уравнения теплопередачи, а также при удалении/подаче жидкости из пленки/в пленку. Как и в [1], использовалось граничное условие Робина на внешней поверхности пленки. Решения этих уравнений реализовывались в числовом коде на каждом этапе времени (аналитический/численный подход). Новая модель была проверена на основе сравнения её предсказаний с чисто числовым кодом. Она была подтверждена на основе экспериментальных данных, доступных в литературе.

Аналитическое решение, представленное в [3], было обобщено с учётом воздействия теплового излучения, как это применялось при нагреве и испарении

капель [2]. Используя наблюдение, что в большинстве практических инженерных приложений изменения теплофизических свойств пленки значительно меньше, чем значения этих свойств, позволило нам свести анализ общего нелинейного уравнения теплопроводности до его слабо нелинейного приближения (без квадратичных членов), в котором рассматривается зависимость плотности жидкости, удельной теплоёмкости и теплопроводности от температуры и положения в пленке.

Список литературы:

1. Sazhin, S.S., Rybdylova, O., Crua, C. A mathematical model for heating and evaporation of a multi-component liquid film. *Int. J. Heat and Mass Transfer* 2018. V.117, P. 252–260.
2. Sazhin, S.S. *Droplets and Sprays: Simple Models of Complex Processes*. Springer (Series 'Mathematical Engineering'). 2022 <https://doi.org/10.1007/978-3-030-99746-5>
3. Barsukov, A.V., Antonov, D.V., Nazarov, A.D., Miskiv, N.B., Nazarov, N.A., Terekhov, V.V., Shchepakina, E.A., Sobolev, V.A., Sazhin, S.S. Heating and evaporation of a multi-component liquid film: effects of heat flux at the wall and continuous supply of liquid. *Physics of Fluids* 2025. 37(12) 122108.

*Работа поддержана Министерством науки
и высшего образования Российской Федерации
(грант № 075-15-2025-007).*

ГАЗОЖИДКОСТНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ: ОТ РАССЛОЕННОГО К КОЛЬЦЕВОМУ РЕЖИМУ

Здорников С.А., Исаенков С.В., Трубицына Л.П., Черданцев А.В.

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

Газожидкостные течения в горизонтальных трубах реализуются в широком спектре практических приложений, от транспортировки нефти и газа до теплообменных аппаратов. При достаточно низких расходах жидкости возможны два режима течения: расслоенный и кольцевой. Режимы течения оказывают существенное влияние на интегральные характеристики потока: например, в расслоенном режиме минимальны потери давления вдоль канала, а в кольцевом максимален отвод тепла от нагреваемых стенок канала.

Переход от расслоенного к кольцевому режиму течения происходит при достаточно высоких скоростях газового потока. Физические механизмы подъема жидкости по стенкам горизонтальной трубы являются предметом давней научной дискуссии. Среди предложенных ранее гипотез можно выделить три основные группы: срыв капель с пленки в нижней части канала и осаждение их на сухие стенки в верхней части [1]; наплеск жидкости крупными волнами [2]; затягивание жидкости наверх вихревыми структурами ("вторичными течениями") в газовом потоке [3]. Все явления имеют место в реальном течении, однако вклад и важность каждого механизма до недавнего времени были не ясны.

Основной причиной такой неопределенности является широко распространенная практика проведения экспериментальных исследований в области установления течения, вдали от входа в канал. В такой постановке исследователи могли лишь сравнивать характеристики течения в установившихся расслоенном и кольцевом режимах, практически не имея возможности проверить выдвигаемые гипотезы. В работе [4] был использован альтернативный подход: жидкость и газ принудительно подавались в канал в конфигурации расслоенного течения, после чего переход от расслоенного к кольцевому режиму можно было наблюдать в динамике, на стадии развития течения. В результате было обнаружено, что при высоких скоростях газового потока подъем жидкости по стенкам трубы происходит достаточно медленно и равномерно, без привязки к крупным волнам и осаждению капель. Более того, подъем начинается у самого входа в канал и может завершиться еще до формирования в нижней части канала первых крупных волн и срываемых капель. При низких скоростях газа и высоких расходах жидкости наблюдается в основном наплеск крупными волнами, однако поднятая таким образом жидкость не удерживается наверху, стекая под действием силы тяжести. Таким образом, механизм подъема жидкости вторичными течениями необходим и достаточен для создания и поддержания кольцевой пленки.

Крупномасштабные волны возмущения, доминирующие в газожидкостных потоках, формируются вблизи входа в канал в его нижней части [5]. По мере распространения вниз по потоку, поперечный размер волны возмущения возрастает. При достаточно высоких расходах жидкости, волны возмущения могут замыкаться в кольцо вокруг периферии канала и далее распространяться как целое, несмотря на различия в толщине пленки в верхней и нижней части канала. Замыкание в кольцо волн возмущения происходит значительно позже замыкания базовой пленки жидкости.

Исследование влияния свойств рабочей жидкости выявило ряд нетривиальных закономерностей [6]. Подъем жидкости по стенкам канала облегчается при высоких значениях вязкости рабочей жидкости. При этом возможно формирование кольцевого режима при полном отсутствии волн возмущения. Эти наблюдения дополнительно подтверждают вывод о важности вторичных течений для подъема жидкости. Уменьшение поверхностного натяжения затрудняет подъем волн возмущения. В дисперсно-кольцевом режиме течения жидкость с низким поверхностным натяжением ведет себя как жидкость с повышенной вязкостью, что, возможно, объясняется интенсивным захватом пузырьков газа пленкой жидкости.

Также проведено исследование влияния конфигурации входного участка на динамику перехода. Проведено сравнение описанной выше подачи жидкости в канал в расслоенном режиме с подачей жидкости через кольцевой зазор. Качественных различий в механизмах подъема жидкости не наблюдается, однако подача жидкости через кольцевой зазор ожидаемо упрощает и ускоряет переход к кольцевому течению.

Список литературы:

1. James P.W., Wilkes N.S., Conkie W., Burns A. 1987. Developments in the modelling of horizontal annular two-phase flow // *Int. J. Multiph. Flow*. 1987. V. 13. N. 2. P. 173–198.
2. Jayanti S., Hewitt G.F., White S.P. Time-dependent behaviour of the liquid film in horizontal annular flow // *Int. J. Multiph. Flow*. 1990. V. 16. N. 6. P. 1097–1116.
3. Vollestad P., Angheluta L., Jensen A. Experimental study of secondary flows above rough and flat interfaces in horizontal gas-liquid pipe flow // *Int. J. Multiph. Flow*. 2020. Vol. 125. P. 103235.
4. Cherdantsev A.V., Zdornikov S.A., Cherdantsev M.V., Isaenkov S.V., Markovich D.M. Stratified-to-annular gas-liquid flow patterns transition in a horizontal pipe // *Exp. Therm. Fluid Sci*. 2022. V. 132. P. 110552.
5. Zdornikov S.A., Isaenkov S.V., Cherdantsev A.V. Axial and azimuthal development of disturbance waves in annular flow in a horizontal pipe // *Int. J. Multiph. Flow*. 2024. V. 172. P. 104704.
6. Zdornikov S.A., Isaenkov S.V., Cherdantsev A.V. The effect of liquid properties on stratified-to-annular transition in a horizontal pipe // *Int. J. Multiph. Flow*. 2026. V. 195. P. 105552.

*Работа поддержана РНФ
(грант № 26-69-00053).*

ГИДРОДИНАМИКА ПАТОЛОГИЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Акулов А.Е.⁴, Богомякова О.Б.³, Бугай Ю.В.¹, Валова Г.С.¹, Горбатов А.В.⁵, Давыдова А.В.¹, Остапенко В.В.¹, Петренко И.А.², Петровский Д.В.⁴, Ромашенко А.В.⁴, Тулупов А.А.³, Шарифуллина Т.С.¹, Хе А.К.¹, Черевко А.А.¹

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

² Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
ул. Горького 87, Владимир, 600000, Россия

³ Международный томографический центр СО РАН,
ул. Институтская 3А, Новосибирск, 630090, Россия

⁴ Институт цитологии и генетики СО РАН,
пр. Лаврентьева 10, Новосибирск, 630090, Россия

⁵ Национальный медицинский исследовательский центр им. акад. Е.Н. Мешалкина,
ул. Речкуновская 15, Новосибирск, 630055, Россия

Жидкостный обмен головного мозга относится к числу ключевых факторов нормального его функционирования. В докладе рассматриваются результаты моделирования различных аспектов этого сложного явления. Эта работа проводилась в течении нескольких лет в Институте гидродинамики СО РАН в сотрудничестве с математиками, медиками и биологами из других научных учреждений.

Изучались как сосудистые патологии - аневризмы и артериовенозные мальформации, так и нарушения жидкостного обмена на малых масштабах приводящие, в частности, к гидроцефалии. Математическое моделирование проводилось с опорой на клинические и экспериментальные (полученные на животных) данные.

Среди полученных дальше всего удалось продвигнуться при моделировании лечения артериовенозной мальформации головного мозга и при описании развития гидроцефалии.

Артериовенозная мальформация головного мозга (АВМ) - врожденная сосудистая патология, при которой артериальное и венозное русла соединяются клубком сросшихся патологических сосудов. Распространенный и предпочтительный способ ее лечения - проведение нейрохирургической операции по эмболизации. При этом патологические сосуды заполняются специальным твердеющим веществом (эмболическим агентом).

Для математического моделирования эмболизации с учетом изменения кровотока в окружении патологии, используется модель двухфазной фильтрации, сопряженная с гидравлической моделью окружающих патологию сосудов. Математически модель описывается цепочкой интегро-дифференциальных гиперболических уравнений с невыпуклой функцией потока.

Задача эмболизации рассматривается как задача оптимального управления, в которой управлением является зависимость подачи эмболизата от времени, а интегральный целевой функционал и ограничения выбираются из медицинских соображений. Поставленная задача оптимального управления исследуется аналитически и численно на основе клинических данных о кровотоке вблизи патологии, полученных во время нейрохирургических операций.

Одним из специфических для головного мозга явлений является фильтрация через мозг цереброспинальной жидкости (ЦСЖ). При нарушении ее фильтрации может возникать такая патология как гидроцефалия, при этом увеличивается объем мозговых желудочков, что приводит к сдавливанию и деформации мозгового вещества.

Изучается влияние взаимодействия жидких сред головного мозга на смещение стенки желудочков и давление на ней. В качестве математической модели используется система уравнений многокомпонентной пороупругой фильтрации для вещества головного мозга. Геометрия мозгового вещества восстанавливается на основании МРТ добровольцев и лабораторных мышей.

На основе результатов моделирования сформирована гипотеза о механизме возникновения и развития одной из разновидностей гидроцефалии. В рамках модели также показано, что для головного мозга мышей и людей наблюдаются качественно те же закономерности развития гидроцефалии, что позволяет проверять предсказания модели экспериментально.

*Работа поддержана РНФ
(грант № 25-25-00873).*

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КИНЕТИКИ СУММАРНОГО ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В МАГМАТИЧЕСКОМ РАСПЛАВЕ ПРИ ЕГО БЫСТРОЙ ДЕКОМПРЕССИИ

Чернов А.А.^{1,2}, Давыдов М.Н.^{1,3}

¹ Новосибирский государственный университет

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

³ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

Процессы дегазации магматических расплавов определяют динамику вулканических извержений. При быстром подъёме магмы к поверхности резкое падение давления (декомпрессия) приводит к пересыщению расплава растворёнными летучими компонентами, вследствие чего начинается нуклеация газовых пузырьков и их диффузионный рост — процесс дегазации. Ключевая особенность реальных условий — декомпрессия происходит с конечной, в общем случае зависящей от времени скоростью. В отличие от классических работ, предполагающих мгновенное создание пересыщенного состояния, в данной работе предложена аналитическая модель, описывающая процесс фазового превращения при конечной скорости декомпрессии магматического расплава.

Прежде чем перейти к описанию кинетики суммарного фазового превращения, рассматривается рост отдельного газового пузырька, механизм которого задаётся уравнением импульсов (обобщение Рэлея-Плессета с учётом неоднородной вязкости), которое решается совместно с уравнением диффузии газа в жидкости, с граничными условиями на межфазной поверхности, описывающими фазовый переход. Кроме того, модель учитывает бародиффузию, обусловленную возникновением больших градиентов давления в жидкости вокруг растущего пузырька. С помощью перехода к системе координат, в которой граница пузырька становится неподвижной, и квазистационарного приближения для концентрационного профиля исходная краевая задача с подвижной границей сведена к интегро-дифференциальному уравнению относительно радиуса пузырька. Получено полуаналитическое решение, справедливое на всех стадиях роста: от инерционной (экспоненциальной) до переходной и асимптотической диффузионной. Показано, что длительность переходной стадии и характер роста существенно зависят от того, успевает ли давление в пузырьке выравняться с внешним давлением. Для случая медленной декомпрессии получено приближённое решение, в котором динамические эффекты пренебрежимо малы, а рост лимитируется только диффузией. Для быстрой декомпрессии вязкие эффекты приводят к заметному запаздыванию падения давления в пузырьке по сравнению с внешним, что увеличивает время установления автомоделного режима. Верификация путём сравнения с результатами численного моделирования (явная схема второго порядка по пространству, метод Рунге-Кутты-Мерсона по времени) на примере риолитового и базальтового расплавов показала расхождение результатов аналитического решения с численным моделированием не более 2 %.

Процесс дегазации условно разделяется на три стадии: стадия нуклеации (как правило, весьма скоротеч-

ная), на которой образуется основное число зародышей; затем стадия роста пузырьков при практически неизменном их количестве; и, наконец, стадия коалесценции, завершающаяся фрагментацией вспененной жидкости. Показано, что давление (пересыщение), при котором начинается лавинообразная нуклеация, существенно зависит от скорости декомпрессии и от объёма, где ожидается появление первого зародыша: чем быстрее осуществляется декомпрессия, тем больших метастабильных состояний (пересыщений) достигает система.

Выделены два предельных сценария дегазации. При больших пересыщениях время нуклеации много меньше времени установления диффузионной стадии роста; пузырьки растут в сильно неравновесных условиях, концентрационное поле остаётся практически однородным, окончание нуклеации определяется интегральным уменьшением пересыщения во всём объёме. При умеренных и малых пересыщениях время нуклеации, напротив, много больше времени установления диффузионной стадии роста; вокруг каждого пузырька формируется квазистационарный диффузионный пограничный слой, поле концентрации при этом существенно неоднородно. Для этого случая используется подход, основанный на выделении в объёме жидкости зон, нуклеация новых зародышей в которых подавлена («исключённый объём»), причём в отличие от предыдущих работ автора учтено перекрытие этих зон. Для обоих сценариев методом последовательных приближений найдены простые аналитические выражения для зависимости объёмной доли газовой фазы от времени, а также числа образующихся зародышей от скорости декомпрессии. «Промежуточный» сценарий реализуется в узком диапазоне режимных параметров и требует численного расчёта.

Таким образом, разработанная модель описывает кинетику суммарного фазового превращения (дегазации) газонасыщенного магматического расплава при его декомпрессии с конечной скоростью. Она может быть использована в качестве составной части гидродинамической картины течения магмы в вулканическом канале, позволяя с меньшими вычислительными затратами (по сравнению с прямым численным моделированием) описывать протекающие в магме фазовые превращения. Полученные результаты важны для понимания механизмов вулканических извержений.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 22-19-00092-П)*

СЕКЦИЯ 1

Теплообмен и гидродинамика
в однофазных средах



ВЛИЯНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ СЛОЯ РАСПЛАВА КОРИУМА, ПОДОГРЕВАЕМОГО ПО НИЖНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ, НА ХАРАКТЕР ТЕЧЕНИЯ В СЛОЕ И ТЕПЛООБМЕН НА ЕГО ГРАНИЦАХ ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ В ЯЭУ

Горбунова Я.А.^{1,2}, Локтионов В.Д.^{1,3}

¹Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), г. Москва, Россия

² Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалея» (АО «НИКИЭТ»), г. Москва, Россия

³Акционерное общество «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электрических станций» (АО «ЭНИЦ»), г. Электрогорск, г. Павловский Посад, Московская область, 142530, Россия

Представлены результаты анализа влияния несимметричных условий охлаждения боковой поверхности слоя расплава стали, подогреваемого снизу, а также температурного состояния его верхней поверхности и геометрических размеров слоя на температурное состояние расплава и величину коэффициента фокусирования тепловой нагрузки в условиях смешанной конвекции при высоких числах Рэлея. Подобный слой расплава (сталь, цирконий и др.) может сформироваться внутри корпуса ядерного реактора в течение тяжелой аварии (ТА) в случае стратификации кориума из-за различной плотности его компонентов. Вследствие меньшей плотности такого слоя по сравнению с оксидными компонентами кориума, такой слой располагается над тепловыделяющей оксидной фазой расплава и подогревается по его нижней поверхности. При рассмотрении такого класса ТА, как правило, принимаются условия осевой симметрии подобной системы. В настоящем исследовании, в отличие от традиционного (симметричной постановки) подхода, рассматриваются несимметричные условия теплообмена боковой поверхности слоя расплава стали, что соответствует случаю ТА когда теплоотвод от боковой поверхности расплава имеет азимутальную неравномерность. Оценка теплового состояния такого слоя и условий теплообмена на его поверхностях является важным элементом при реализации стратегии внутрикорпусного удержания расплава в реакторах ВВЭР и PWR при ТА [1].

В настоящей работе, на основе CFD моделирования был выполнен параметрический анализ влияния аспектного числа (h/R) слоя, а также степени несимметрии в условиях бокового охлаждения (различие в коэффициентах теплоотдачи) и условий теплообмена на верхней поверхности слоя на характер течения расплава в слое, а также на температурное состояние и параметры теплоотдачи на боковой и нижней поверхностях слоя. На нижней поверхности слоя задавались граничные условия 2-о рода с равномерным распределением тепловой нагрузки по радиальной координате. На боковых (левой и правой) поверхностях слоя, а также на его верхней поверхности задавались граничные условия 3-о рода. Анализ результатов CFD моделирования позволил оценить значения коэффициентов фокусирования тепловой нагрузки на боковых поверхностях слоя. CFD моделирование выполнялось с помощью расчетного кода «ANES» [2]. Анализ полученных результатов показал, что несимметричные условия теплообмена на боковых поверхностях слоя

приводят к формированию в слое расплава двух (и более) циркуляционных ячеек с различным направлением движения расплава. При этом, увеличение степени несимметричности в условиях теплообмена приводит к ярко выраженной асимметрии в размерах таких циркуляционных ячеек. Так, для слоя с аспектным числом $h/R=0.4$ и при значениях коэффициентов теплоотдачи на левой и правой сторонах слоя равных 1000 и 5000 Вт/(К м²), соответственно, размер правой ячейки вдоль радиальной координаты слоя превышает аналогичный размер левой в ~3,6 раза. Наибольшие расхождения между средними по объему температурами ячеек наблюдаются при малых толщинах ($h/R=0.1$) слоя. С ростом аспектного соотношения этот дисбаланс уменьшается, что свидетельствует о «сглаживающем» влиянии увеличения высоты слоя на температурную несимметрию в ячейках слоя.

Также, в работе была проверена возможность использования ранее разработанных корреляций [3, 4] для оценки значений чисел Нуссельта и средней температуры в ячейках расплава, формирующихся при несимметричных условиях теплообмена на боковых поверхностях слоя.

Представленные в работе результаты являются новыми для отечественной и зарубежной практики анализа ТА в корпусных ядерных реакторах, и является важным экспериментальное их подтверждение.

Список литературы:

1. Theofanous, T.G., Liu, C., Additon, S., Angelini, S., Kymäläinen, O., Salmassi, T., 1996. In vessel Coolability and Retention of a Core Melt. DOE/ID-10460. U.S. Department of Energy Vol. 1.
2. «ANES/20XE : Код для численного моделирования процессов гидродинамики и тепломассообмена. Версия 3.10. Описание математических моделей кода» // Москва. 2024, 130 с. (<http://anes.ch12655.tnweb.ru/index.php/features>).
3. Loktionov, V., 2025. "Correlations for the bulk temperature and for the Nusselt numbers at the boundary surfaces of a molten steel layer heated from below under the severe accident conditions". Nuclear Engineering and Design. No. 433. 113851. p. 20.
4. Loktionov, V., 2024. "Modified correlations for the Nusselt numbers at the boundaries of a bottom-heated molten metal layer in a stratified corium melt pool and an assessment of heat transfer conditions during a severe accident". Nuclear Engineering and Design. No. 112760. (2024). p. 13.

РОЛЬ ПОЛОИДАЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ, СОЗДАННЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ СЖИМАЮЩИМИ И ВРАЩАЮЩИМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ СИЛАМИ, В ТЕПЛООБМЕНЕ ТРАНЗИТНОГО ПОТОКА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Колесниченко И.В., Митрополит И.Ю., Полуянов А.О., Озерных В.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
ул. Академика Королева 1, Пермь, 614018, Россия

Теплообмен и гидродинамика жидких металлов играют существенную роль в технологических процессах металлургии и атомной энергетики. Особенность этих процессов заключается в использовании возможности бесконтактной генерации электромагнитных сил в жидком металле. Эти силы вызывают течения, конфигурацией и интенсивностью которых можно управлять. Наиболее широкое применение получили способы бесконтактного создания сил, обновленные на использовании бегущих и вращающихся магнитных полей, которые наилучшим образом себя проявляют в цилиндрических ячейках и каналах. Течения могут существенно влиять на процесс теплообмена жидкого металла с окружающей средой, перераспределяя температуру из более нагретых центральных областей в менее нагретые пристеночные области. Этому способствует создание первичных полоидальных течений под действием бегущего магнитного поля или обжимающих сил, вызванных действием уединенных соленоидов с переменным магнитным полем, а также вторичных полоидальных течений, вызванных вращающимся магнитным полем.

На литейном производстве именно бегущее магнитное поле усиливает вторичные полоидальные течения от вращающегося поля, которые приводят к гомогенизации распределения температуры в ходе кристаллизации и формированию однородной структуры зерен [1]. Бегущее магнитное поле, в основном используемое в насосах [2], может быть использовано для гомогенизации температуры в теплообменных аппаратах, задействованных в изучении конвективных процессов [3]. Обжимающие силы, возникающие при воздействии локализованного переменного поля, могут быть использованы как для контроля характеристик течения [4], так и для управления неоднородными смешивающимися потоками с целью предотвращения термоциклической усталости [5]. Совмещение генерации транзитного и закрученного течений [6] способно обеспечить наиболее универсальное управление процессом как течения, так и теплообмена. Многообещающие результаты связаны с контрвихревыми течениями, действие которых может привести как к генерации развитых полоидальных течений в замкнутых ячейках [7], так и к подавленным полоидальным течениям в канале с транзитным потоком [8].

Таким образом, все перечисленные способы бесконтактного создания локализованных электромагнитных сил способны генерировать полоидальные течения, приводящие к переносу тепла из более нагретой области к менее нагретой для улучшения теплообмена. Однако, результирующее полоидальное течение в транзитном потоке будет различаться. Действие вращающихся электромагнитных сил приводит к возникно-

ванию полоидального течения от оси канала к его периферии, а действие обжимающих пинчевых электромагнитных сил приводит к течению от периферии к центру.

Цель работы заключается в поиске наиболее эффективного и наименее затратного из них способа повышения теплообмена. Для этого выполняется численное исследование с помощью математической модели магнитогидродинамических процессов. Многовариантные расчеты процессов в описанных конфигурациях устанавливают основные особенности течений жидкого металла в цилиндрическом канале и теплообмена с окружающей средой. Результаты демонстрируют повышение эффективности теплообмена при воздействии сил. Получены зависимости характеристик теплообмена от параметров систем, задающих интенсивность сил. Разработанные устройства могут быть использованы в машинах непрерывного литья и теплообменниках атомных станций с жидкометаллическим теплоносителем.

Список литературы:

1. Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., Kolesnichenko I., Nikulin L. The effect of traveling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible // *Magnetohydrodynamics*. 2014. Vol. 4, no. 4. P. 407–422.
2. Khalilov R., Kolesnichenko I. Annular linear induction pump for liquid sodium // *Magnetohydrodynamics*. 2015. Vol. 51, No. 1. P. 95–103.
3. Zwirner L., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pavlinov A., Mandrykin S., Shestakov A., Teimurazov A., Frick P., Shishkina O. The influence of the inclination angle on the heat transport and large-scale circulation in liquid metal convection // *Journal of Fluid Mechanics*. 2020. Vol. 884. P. A18–1–37.
4. Poluyanov A., Kolesnichenko I. Experimental study of liquid metal flow for the development of a contact-less control technique // *Fluid dynamics and materials processing*. 2024. V. 20. P. 1553–1564.
5. Колесниченко И., Халилов Р., Шестаков А., Крылов А., Пахолков В., Павлинов А., Мамыкин А., Васильев А., Рогожкин С., Фрик П. Перемешивание разнотемпературных потоков жидкого натрия в трубопроводе за тройником // *Теплоэнергетика*. 2023. № 3. С. 49–57.
6. Митрополит И.Ю., Гольбрайх Е., Колесниченко И.В. Закрученное МГД-течение в замкнутом канале круглого сечения // *Журнал технической физики*. 2026. Т. 96. № 2. С. 199–211.
7. Losev G., Mamykin A., Kolesnichenko I. Rich vortex dynamic of liquid metal in T-shaped cylindrical cell under counter-rotating magnetic field action // *Journal of Fluid Mechanics*. 2025. V. 1023. P. A42.
8. Kolesnichenko I., Ozernykh V. Interaction between counter-rotating azimuthal and axial liquid metal flows in cylindrical channel // *Physical Review Fluids*. 2025. V. P. 113701.

*Работа поддержана Правительством
Пермского края (соглашение
СЭД-26-08-08-35 от 29.01.2024 г.).*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАГРАДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ШАГА МЕЖДУ ОТВЕРСТИЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Котляр А.А., Веретенников С.В., Евдокимов О.А.

РГАТУ имени П.А. Соловьева,
ул. Пушкина, д. 53, г. Рыбинск, 152934, Россия

С целью обеспечения потребной температуры сопловых и рабочих лопаток турбин высокого давления применяется технология конвективно-заградительного охлаждения. Конвективная составляющая позволяет отвести тепло от металла за счет теплообмена [1], при заградительном охлаждении холодный воздух выдувается через специальные отверстия на поверхность лопатки и образует у ее поверхности слой относительно холодного газа [2]. На эффективность заградительного охлаждения большое влияние оказывает геометрическая форма отверстий для вдува охладителя и параметр вдува m (1).

$$m = \frac{\rho_{\text{охл}} * V_{\text{охл}}}{\rho_{\text{г}} * V_{\text{г}}} \quad (1)$$

где $\rho_{\text{охл}}$, $\rho_{\text{г}}$ - плотности охлаждающего воздуха и основного потока; $V_{\text{охл}}$, $V_{\text{г}}$ - скорость охлаждающего воздуха и основного потока.

Значение данного параметра по поверхности пера лопатки и режима работы двигателя может изменяться в достаточно широком диапазоне от 0,5 до 2,5. Однако при любом значении необходимо, чтобы температура на поверхности лопатки не превышала установленных для нее значений.

На практике, чаще всего для вдува газовой завесы применяются отверстия цилиндрической формы. Большое количество научных исследований показывают, что использование отверстий с расширяющимся участком позволяют снизить значение параметра вдува m перед выдувом на защищаемую поверхность, что приводит к росту эффективности тепловой защиты поверхности [3]. При этом изменение шага между отверстиями для вдува газовой завесы может привести к снижению или росту эффективности охлаждения. Таким образом необходимо выполнение исследований с целью определения наиболее оптимального значения относительного шага между отверстиями различной геометрической формы.

В данной работе представлены результаты исследования влияния изменения относительного шага t/d от 4 до 6 между отверстиями цилиндрической, скошенной и веерной формы с длиной расширяющейся частью $L/d=1$. Диаметр цилиндрической части отверстий составлял $d=5$ мм, угол наклона к поверхности $\alpha=30^\circ$. Экспериментальные исследования проводились методом цифровой трассерной визуализации (PIV) и методом ИК термографирования.

По результатам PIV исследования было получено, что за отверстиями цилиндрической формы и веерным отверстием взаимодействие между соседними струями наблюдается только при относительном шаге $t/d=4$ и значении параметра вдува $m>1,5$. Так же необходимо отметить, что за отверстием цилиндрической формы при $m>1$ наблюдается глубокое проникновение

струи охладителя в основной поток и происходит отсоединение от защищаемой поверхности. За отверстиями скошенной формы взаимодействие между отверстиями наблюдается при $t/d=4$ и $m>0,8$. Увеличение относительного шага до $t/d=6$ приводит к отсутствию взаимодействия между струями формируемыми отверстиями всех форм.

По результатам ИК термографирования было получено, что увеличение параметра вдува m до 1 приводит к отрыву газовой завесы от поверхности. Применение веерных отверстий позволяет существенно повысить эффективность охлаждения по сравнению с отверстиями цилиндрической формы. Однако, осредненная эффективность веерных отверстий при $m=1$ не превышает $\eta=0,2$ при $t/d=4$ на удалении до $10d$ от места вдува. Увеличение параметра вдува m до 1,5 приводит к снижению эффективности охлаждения на 10%. При этом изменение относительного шага от 4 до 5d так же приводит к снижению уровня тепловой защиты поверхности $\approx 20\%$.

Применение отверстий скошенной формы позволяет повысить эффективность охлаждения при $m=1$ и $t/d=4$ на 43% по сравнению с веерными отверстиями. Так же использование отверстий данной формы позволяет обеспечить примерно одинаковый уровень тепловой защиты поверхности при изменении параметра вдува m от 1 до 2,5.

Таким образом отверстия цилиндрической формы не позволяют обеспечить надёжную тепловую защиту поверхности при всех значениях параметра вдува, что обуславливается быстрым отрывом струи охладителя за отверстиями данной формы. Отверстия скошенного типа позволяют избежать отрыва газовой завесы от поверхности и избежать снижения уровня тепловой защиты при изменении $m=1..2,5$. Однако применение отверстий данной формы позволяет обеспечить максимальную эффективность охлаждения $\eta \approx 0,34$ при $t/d=4$. Увеличение шага до 5d приведет к снижению уровня тепловой защиты поверхности на 20%.

Список литературы:

1. Mujumdar A. S. A Review of: "Modelling and Simulation of Turbulent Heat Transfer": Editors: B. Sunden and M. Faghri, WIT Press, Billerica, Massachusetts, 2004, 348 pp, ISBN 1-85312-956-9. // *Drying Technology*. 2005. Т. 23, № 7. С. 1591–1592.
2. R. J. Goldstein, Film Cooling', in *Advances in Heat Transfer*, vol.7, Elsevier, 1971, pp. 321–379.
3. Chen A. F., Li S.-J., Han J.-C. Film Cooling for Cylindrical and Fan-Shaped Holes Using Pressure-Sensitive Paint Measurement Technique // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2015. Т. 29, № 4. С. 775–784.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА КОНИЧЕСКОМ ВИНТОВОМ ВИХРЕ

Куйбин П.А.

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

Вихревые течения часто встречаются в природе и широко применяются в технических устройствах. Закрутка потока улучшает теплообмен, стабилизирует процессы. В то же время с вихревыми явлениями связаны повышенный шум, кавитация, резонансы. Поэтому важно углублять понимание особенностей вихревых течений. Одной из наиболее распространенных форм вихрей является винтообразная форма. В экспериментах, проведенных в ИТ СО РАН, было обнаружено, что такой вихрь может быть подвержен развитию неустойчивости, проявляющейся в сближении соседних витков вихревой спирали и последующем вихревом пере замыкании с образованием вихревых колец [1]. В работе [2] численно, интегрируя уравнения движения на основе закона Био-Савара, автор получил пере замыкание и отрыв вихревых колец. При этом было показано, что динамику, предшествующую пере замыканию, можно рассчитать с помощью наиболее экономичного метода – метода локально-индукционного приближения (LIA), который сводится к нелинейному уравнению Шрёдингера (НУШ) [3]. В недавней работе [4] путем интегрирования НУШ изучена динамика конического винтового вихря (в отличие от цилиндрического винтового вихря, рассмотренного в [2]). Показано развитие волн на вихре и обнаружена специфическая волна, в которой кручение вихревой нити обращается в ноль, что в эксперименте [1] соответствовало формированию вихревой петли, предшествовавшей пере замыканию. В данной работе представлены результаты изучения характеристик волн, образующихся на коническом винтовом вихре.

Рассмотрим, как и в [4], эволюцию конического винтового вихря, начальная геометрия которого задается формулами

$$\begin{aligned} x &= r_0(z) \cos(\lambda z), \quad y = r_0(z) \sin(\lambda z), \\ r_0(z) &= 0.5[1 + \tanh(kz)]. \end{aligned} \quad (1)$$

Формулы (1) соответствуют вихрю, являющемуся прямолинейным при $z \rightarrow -\infty$, проходящему коническую стадию (с углом раскрытия конуса $2\arctg[k/2]$ при $z = 0$), и переходящему в цилиндрический винтовой вихрь при $z \rightarrow \infty$. Параметр λ – это волновое число ($2\pi/\lambda$ – шаг винтовой спирали).

Изучение эволюции геометрии вихря сводится к решению нелинейного уравнения Шрёдингера

$$i\psi_t + \psi'' + 2|\psi|^2\psi = 0, \quad (2)$$

где комплексная функция ψ связана с кручением τ и кривизной κ вихревой линии соотношением

$$\psi = (\kappa/2) \exp\left(i \int_0^s \tau ds\right).$$

Здесь s – дуговая координата, которая для кривой (1) выражается через интеграл

$$s(r_0) = \frac{1}{2k} \int_{0.5}^{r_0} \sqrt{4k^2(1-r)^2 + \lambda^2} r^2 + 1 \frac{dr}{r(1-r)}.$$

Уравнение (2) решается методом конечных разностей. В представленных результатах расчетов выбран интервал интегрирования по s $[-10, 9.5]$, шаг по s 0.01 , шаг по времени 10^{-6} , параметры $k = 1.5$, $\lambda = \pi$. На рис. 1 показаны зависимости кручения и кривизны в момент времени $t = 0.07$. Рассмотрены характеристики волн кручения в диапазоне изменения s $[-4, -1.5]$ и их динамика во времени от $t = 0.06$ до $t = 0.07$. Показано, что зависимости положения максимумов и минимумов от времени можно обобщить функциями вида

$$s_{ext,n} = (a_0 + a_1 n + a_2 n^2)t + b_0 + b_1 n + b_2 n^2,$$

где n – номер волны. Волны движутся влево, длины волн со временем растут, а с удалением от точки $s = 0$ убывают. Сами значения экстремумов кручения удаётся описать зависимостями

$$\begin{aligned} \tau_{ext,n} &= \tau_{lim} \mp \exp(A_0 + A_1 n + A_2 n^2) \pm \\ &\exp[B_0 + B_1 n + B_2 n^2 + (C_0 + C_1 n + C_2 n^2)t] \end{aligned}$$

Здесь верхний знак соответствует максимумам, а нижний – минимумам кручения. τ_{lim} – значение кручения при $s \rightarrow -\infty$. В рассматриваемом примере $\tau_{lim} = \lambda$.

Проведенный анализ позволил найти также и аппроксимацию для кручения, как функции от s и t .

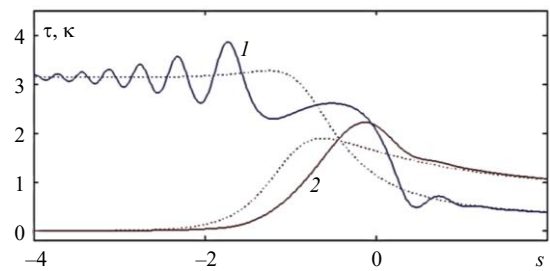


Рис. 1. Графики $\tau(s)$ (1) и $\kappa(s)$ (2) в момент времени $t = 0.07$. $k = 1.5$, $\lambda = \pi$. Пунктирные линии – зависимости при $t = 0$.

Список литературы:

1. Алексеев С.В., Куйбин П.А., Шторк С.И., Скрипкин С.Г., Цой М.А. Явление вихревого пере замыкания в закрученном потоке // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, Вып. 7. С. 516–521.
2. Salman H. Breathers on Quantized Superfluid Vortices // Physical Review Letters. 2013. Vol. 111. P. 165301–1–165301–5.
3. Hasimoto H. A soliton on a vortex filament // J. Fluid Mech. 1972. Vol. 51. P. 477–485.
4. Куйбин П.А. Моделирование динамики винтового вихря на основе нелинейного уравнения Шрёдингера // Письма в ЖТФ. 2026. Т. 62, Вып. 9. С. 49–52.

Работа поддержана РФФ
(грант № 25-79-10154).

КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ ЧИСЕЛ НУССЕЛЬТА НА ГРАНИЦАХ СЛОЯ ЖИДКОСТИ, ПОДОГРЕВАЕМОГО СНИЗУ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЕЛ ПРАНДТЛЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ НА ГРАНИЦАХ СЛОЯ

Локтионов В.Д.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250, Россия

² Акционерное общество «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электрических станций» (АО «ЭНИЦ»),
ул. Святого Константина, 6, г. Электрогорск, Московской обл., 142530, Россия

Разработаны корреляции для чисел Нуссельта на боковой и нижней поверхностях горизонтального цилиндрического слоя расплава/жидкости, подогреваемого по нижней и охлаждаемого по его боковой и верхней поверхностям, в условиях смешанной конвекции при высоких числах Рэлея.

Данные корреляции учитывают размеры слоя и радиальную неравномерность распределения температуры в нем [1], а также параметры вязкости расплава. В разработанных корреляциях используются как традиционные (число Рэлея), так и дополнительные параметры, учитывающие температурные условия на его граничных поверхностях, размеры слоя и параметры вязкости (число Прандтля) среды.

Определение неизвестных коэффициентов в корреляциях выполнялось с использованием результатов численных CFD экспериментов (свыше 400 опытов). CFD моделирование выполнялось при задании условий 1-о рода на границах слоя. Численное моделирование турбулентной конвекции и теплового состояния модельного слоя выполнялось с использованием расчетного CFD кода «ANES» [2] на основе RANS подхода, а также с использованием двухпараметрической модели турбулентности «k- ω » с универсальными пристенными функциями, предложенными Ментером. При численном моделировании принималось, что модельный расплав представляет собой ньютоновскую жидкость без внутренних источников тепловыделения, а эффекты плавления/ кристаллизации модельной среды в данном исследовании не рассматривались.

Сравнительный анализ показал хорошее качество аппроксимации полученных корреляций расчетных значений, определенных на основе CFD моделирования, в диапазонах значений чисел $Ra=10^6$ - 10^{13} и Прандтля $Pt=0.01$ -4.5, и было установлено, что уменьшение числа Прандтля приводит к существенному росту чисел Nu на поверхностях слоя.

Точность аппроксимации оказалась более высокой у корреляций, в которых зависимость числа Nu от числа Pt имеет более сложный характер по сравнению с традиционной степенной формой зависимости и которая используется в большинстве корреляций для чисел Nu.

Существенное влияние на величину числа Nu оказывают величина разницы между значениями температур верхней и боковой, а также боковой и нижней поверхностей слоя. Использование известных корреляций для оценки чисел Nu может приводить к занижению значений чисел Nu по сравнению с полученными корреляциями, что является критичным при

оценке тепловых нагрузок на корпус ядерного реактора в условиях ТА [3].

Адекватное сопоставление между собой различных корреляций для чисел Нуссельта возможно проводить лишь при условии использования одной и той же формы представления зависимости для числа Рэлея. Значения чисел Рэлея, используемые в известном соотношении «Churchill & Chu» при определении чисел Нуссельта, могут значительно (до двух порядков) превышать аналогичные значения чисел Ra , рассчитанные с использованием «классического» соотношения для числа Рэлея, что необходимо принимать во внимание при выполнении такого сопоставительного анализа.

Полученные корреляции позволяют более точно оценивать тепловые нагрузки на корпус ядерного реактора в условиях ТА, когда внутри корпуса ЯЭУ формируется стратифицированная ванна расплава коридума. Для подтверждения точности и работоспособности разработанных корреляций для чисел Nu на поверхностях горизонтального слоя расплава/жидкости необходимо постановка и проведение экспериментальных исследований с модельными материалами и в условиях, которые соответствуют режимам протекания ТА в ЯЭУ.

Список литературы:

1. Loktionov, V., 2025. "Correlations for the bulk temperature and for the Nusselt numbers at the boundary surfaces of a molten steel layer heated from below under the severe accident conditions". Nuclear Engineering and Design. No. 433. 113851. p. 20. (<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.113851>).
2. «ANES/20XE : Код для численного моделирования процессов гидродинамики и тепломассообмена. Версия 3.10. Описание математических моделей кода» // Москва. 2024, 130 с. (<http://anes.ch12655.tmweb.ru/index.php/features>).
3. In vessel coolability and retention of a core melt // T.G. Theofanous, C. Liu, , S. Additon, S. Angelini, O. Kymäläinen, T. Salmassi. V. 1. U.S. Department of Energy, 1996. DOE/ID-10460.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОПЕРЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Лукиянов Ал.А., Личиков И.В., Ягодницына А.А., Шестаков М.В.

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

Совершенствование конструкций активных зон ядерных реакторов, в частности тепловыделяющих сборок (ТВС) с проволоочной навивкой, требует углубленного понимания гидродинамических процессов, определяющих эффективность теплоотвода и безопасность эксплуатации. Навивка выполняет не только дистанционирующую функцию, но и инициирует организацию поперечного потока и межканального массообмена, формируя сложную трёхмерную структуру течения с выраженными вихревыми зонами и анизотропией. Несмотря на активное развитие вычислительной гидродинамики, сохраняется острая необходимость в получении высококачественных экспериментальных данных для верификации расчетных моделей, особенно в условиях ограниченного оптического доступа.

В последние годы для решения подобных задач активно применяются панорамные оптические методы, в частности метод цифровой трассерной визуализации (PIV). Данный бесконтактный метод позволяет регистрировать мгновенные поля скорости с высоким пространственным разрешением, не внося возмущений в исследуемый поток [1, 2]. Однако применение классического PIV в плотных пучках стержней сопряжено с трудностями оптического доступа, что стимулирует поиск новых методических решений.

В работе исследуется структура поперечного течения в модели ТВС из семи имитаторов тепловыделяющих элементов с проволоочной навивкой. Особенностью работы является использование объектива-микроскопа Infinity K2/SC в оптической схеме метода PIV. Данная модификация метода позволила производить измерение через торец модели с высоким пространственным разрешением и обеспечила доступ к поперечным сечениям потока.

Эксперименты выполнены на гидродинамическом стенде, рабочий участок которого представлял собой прозрачный цилиндрический канал длиной 770 мм с внутренним диаметром 44 мм. Внутри канала в гексагональном порядке размещены семь стержней диаметром 13 мм с проволоочной навивкой диаметром 1,17 мм и шагом 250 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода с полиамидными трассерами (размер 20 мкм) при постоянной температуре 25°C. Число Рейнольдса, рассчитанное по среднерасходной скорости и гидравлическому диаметру, составило $Re \approx 1300$. Регистрация изображений проводилась в последовательных поперечных сечениях на расстоянии от 5 до 250 мм от торца модели.

Расчёт мгновенных полей скорости проводился по предварительно обработанным изображениям с использованием итерационного многосеточного кросс-корреляционного алгоритма [3]. Пространственное разрешение поля скорости составило $0,12 \times 0,12$ мм на вектор.

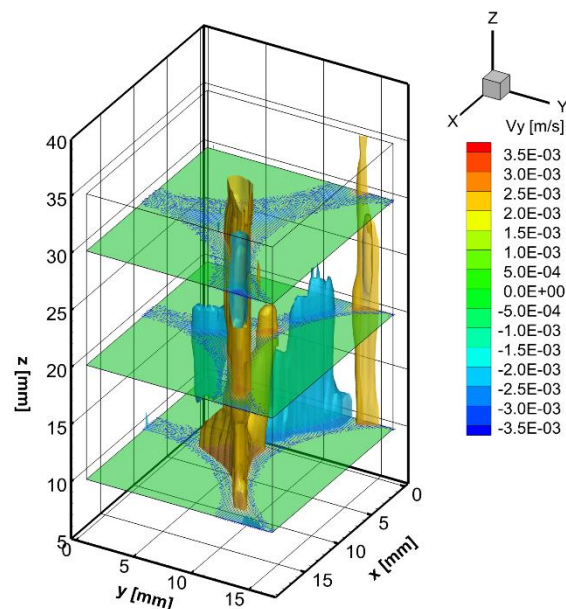


Рис. 1. 3D изоповерхности осредненной поперечной компоненты скорости в пространстве между тремя твэлами.

Применение модифицированной методики PIV позволило изучить мгновенную и осредненную структуру поперечного течения в модели семиэлементной ТВС с проволоочной навивкой. Установлено, что винтовая навивка оказывает доминирующее влияние на топологию потока: в ее окрестности формируются области с повышенными градиентами скорости, наблюдаются возвратные течения и перераспределение потока между ячейками пучка. Измерения полей скорости в последовательных поперечных сечениях позволили реконструировать трехмерную структуру поперечного течения в пространстве между имитаторами твэлов (рис. 1). Полученный массив данных благодаря высокому разрешению представляет особую ценность для верификации CFD-моделей турбулентных течений в сложных конфигурациях.

Список литературы:

1. Nguyen T., Goth N, Jones Ph., Vaghetto R., Hassan Y. Stereoscopic PIV measurements of near-wall flow in a tightly packed rod bundle with wire spacers // Exp. Therm. Fluid Sci. 2018. V 92, P. 420-435.
2. Wang H., Sun M., Fan D., Hu H., Liang P., Yan J. Experimental investigation of the crossflow of water in a 7-pin wire-wrapped rod bundle. // Exp. Therm. Fluid Sci. 2023. V.149, P. 111010
3. Токарев М.П. и др. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12., С. 109–131.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации,
Соглашение № 075-15-2025-572.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАДЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В СБОРКЕ С ВИНТОВЫМ КРЕСТООБРАЗНЫМ ПРОФИЛЕМ

Лукьянов А.А.¹, Сухачев М.М.², Вожаков И.С.¹

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

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

Геликоидально-крестовидное топливо (НСФ) является перспективной концепцией для водо-водяных энергетических реакторов. Стержни НСФ имеют четырехлопастное поперечное сечение и закручены по винтовой линии, что обеспечивает повышенную теплоотдачу и интенсивное поперечное перемешивание теплоносителя. Самоподдерживающаяся конструкция исключает дистанционирующие решетки, снижая гидравлические потери. Согласно [1], данная геометрия позволяет увеличить мощность на 17% в существующих PWR и более 30% в реакторах нового поколения. Ранее [2] исследовались малые сборки, однако систематический анализ влияния размера отсутствовал. [1] показали, что минимальным представительным размером для моделирования активной зоны является сборка 9×9.

Целью работы является численное исследование гидродинамических характеристик в сборке НСФ размером 3×3 с помощью OpenFOAM.

Численное моделирование проведено с помощью открытого программного кода OpenFOAM с использованием стационарного решателя simpleFoam для несжимаемой жидкости ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$). Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) применялась модель турбулентности $k-\omega$ SST [3], которая, согласно [4], показывает наилучшее согласие с экспериментальными данными по перепаду давления для НСФ-сборок. Рассматривалась сборка 3×3 НСФ. Геометрические параметры сборки (шаг решетки 12.75 мм, шаг закрутки 500 мм) соответствуют данным из [1]. Расчетная область имеет длину 125 мм. На входной и выходной границах заданы периодические граничные условия с фиксированным градиентом давления, на стенках стержней и канала — условие прилипания. Использована структурированная гексаэдральная сетка со сгущением у стенки.

Моделирование выполнено в диапазоне чисел Рейнольдса от 10000 до 20000, что соответствует развитию турбулентному течению. На рис. 1 представлено сравнение коэффициента трения для сборки 3×3 с данными [1] в диапазоне $Re = 10000\text{--}20000$. Расхождение не превышает 10%, что подтверждает корректность применяемой методики. Проведен анализ распределения аксиальной скорости в характерных сечениях сборки, соответствующих углам закрутки 0° , 45° . Максимальная аксиальная скорость достигается в центре субканалов и составляет примерно 1.4 от средней скорости потока. В пристеночных областях и вблизи стержней формируются зоны пониженной скорости. Исследованы профили турбулентной кинетической энергии и диссипации, показано, что интенсивность турбулентности максимальна в областях с высокими

градиентами скорости — в зазорах между соседними стержнями и вблизи стенок канала.

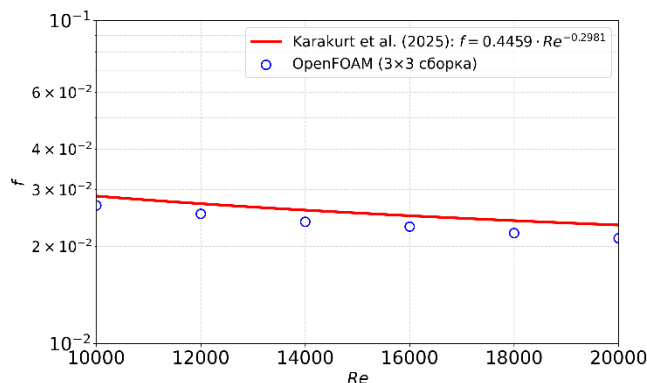


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от числа Рейнольдса.

Список литературы:

1. Karakurt, U., Kim, H., Seo, J., & Hassan, Y. A. (2025). Numerical investigation of pressure drop and flow behavior in a 9×9 helical-cruciform fuel assembly. *Nuclear Engineering and Design*, 445, 114448.
2. Conboy T. M., McKrell T. J., Kazimi M. S. Experimental investigation of hydraulics and lateral mixing for helical-cruciform fuel rod assemblies // *Nuclear Technology*. – 2013. – Т. 182. – №. 3. – С. 259-273.
3. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA journal*. – 1994. – Т. 32. – №. 8. – С. 1598-1605.
4. Xiao, Y., Fu, J., Zhang, Q., Zhao, H., Gu, H. Development of a flow sweeping mixing model for helical fuel rod bundles. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, vol. 160, 108428. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108428.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации,
Соглашение № 075-15-2025-572.*

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ LES СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Макаров М.В.¹, Клементьев А.А.¹, Ковешников К.С.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250, Россия

² Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук «ИБРАЭ РАН»,
ул. Большая Тульская, 52, Москва, 115191, Россия

Изучение процессов теплообмена и гидродинамики при смешанной конвекции жидких металлов в каналах и трубах под воздействием магнитных полей и неоднородных тепловых нагрузок является актуальной задачей при проектировании бланкетов термоядерных реакторов. Одной из особенностей данных течений является эффект аномальных пульсаций температуры низкой частоты и высокой амплитуды, не свойственный турбулентным пульсациям и проявляющийся при определенных режимных параметрах. Открытие данного эффекта послужило импульсом для широкого спектра как экспериментальных, так и расчетных (методом DNS) работ, подробный обзор которых можно найти в [1]. Однако вопрос исследования температурных пульсаций внутри стенок каналов в данных работах не рассматривался, хотя подобные пульсации могут привести к превышению допустимых термонапряжений и разрушению конструкций. Данный пробел компенсируется расчетами смешанной конвекции ртути в круглых трубах, проведенными авторами доклада методом LES в сопряженной со стенкой постановке [2].

В настоящей работе численно исследуется смешанная конвекция ртути в каналах прямоугольного сечения с моделированием стенки канала и пленки загрязнений на ее внутренней поверхности. Расчеты проведены с помощью CFD-кода ANES [3]. Использовался метод контрольного объема с аппроксимациями второго порядка точности по времени и пространству.

На рис. 1 показан пример расчета опускного течения ртути в вертикальном канале прямоугольного сечения при одностороннем обогреве с постоянной плотностью теплового потока $q_w=35 \text{ кВт/м}^2$ в поперечном магнитном поле с максимальной индукцией $B_0=1 \text{ Тл}$. Модель канала соответствует экспериментальной установке RK2 [4]. Внутренние размеры поперечного сечения канала $a \times b = 56 \times 17 \text{ мм}$, толщина стенки из нержавеющей стали – 2,5 мм, общая длина канала – 1,4 м.

Задача решалась при постоянных свойствах ртути, стали и пленки загрязнений, взятых при температуре 20 °С. Силы плавучести моделировались в приближении Буссинеска. Для решения МГД задачи использовалось безындукционное приближение. Применен метод LES с моделью подсеточной вязкости CSM, предложенной в [5]. Критерии подобия Рейнольдса, Грасгофа и Гартмана, рассчитанные по масштабу длины $D_f=2b$, составляли: $Re=2 \cdot 10^4$, $Gr=8 \cdot 10^8$, $Na=800$, число Прандтля $Pr=0,025$. Электропроводность пленки загрязнений σ_r вычислялась с помощью заданного коэффициента контактного сопротивления $k_r = \sigma \delta_r / D_f \sigma_r = 1000$ (σ – электропроводность ртути, δ_r – толщина пленки).

На рис. 1 хорошо видно образование сложной структуры крупномасштабных вихрей в направлении оси z при этом в направлении вектора индукции магнитного

поля (оси x) значения скорости и температуры практически неизменны.

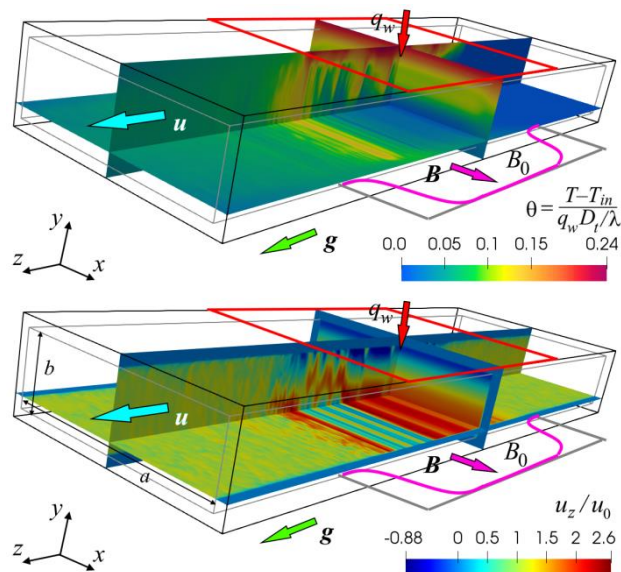


Рис.1. Схема расчетной области и мгновенные поля температуры θ и аксиальной скорости u_z/u_0

В докладе приводятся результаты расчетов при различных режимных параметрах. Обсуждаются механизмы возникновения неустойчивости течения, приводящей к аномальным пульсациям температуры. Показано влияние контактного электрического сопротивления пленки загрязнений на структуру потока и теплообмен.

Список литературы:

1. Zikanov O., Listratov Y., Belyaev I., Frick P., Razuvanov N., Sviridov V. Mixed convection in pipe and duct flows with strong magnetic fields // Appl. Mech. Rev., Jan 2021, 73(1): 010801.
2. Макаров М.В., Яньков Г.Г., Артемов В.И. Численное исследование неустойчивости опускного течения ртути в неравномерно обогреваемой круглой трубе под воздействием поперечного магнитного поля. Инженерно-физический журнал, Т. 98, № 1, 2025.
3. Код ANES [Электронный ресурс]. URL: <http://anes.ch12655.tmweb.ru/> (дата обращения: 10.04.2026).
4. Razuvanov N., Frick P., Belyaev I., Sviridov V. Experimental study of liquid metal heat transfer in a vertical duct affected by coplanar magnetic field: Downward flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. Vol. 143, 118529.
5. Kobayashi H. The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow // Phys. Fluids. 2005. 17, 045104.

Работа поддержана РФФ №25-29-01714.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ ПОТОКА ГЕЛИЙ-КСЕНОНОВОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ПРАНДТЛЯ В СЕМИЭЛЕМЕНТНОЙ СБОРКЕ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ ТЕПЛОВОДЕЛЕНИИ

Макаров М.С., Лебеда К.С., Наумкин В.С., Герасимов А.С.

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

В работе приводятся результаты численного моделирования термогазодинамики потока и температурных полей на стенках тепловыделяющих элементов в семиэлементной сборке. Теплоносителем является смесь гелия и ксенона с массовой концентрацией гелия 7,2% при высоком давлении – 40 атм. Число Прандтля смеси – 0,23, что существенно меньше, чем для воздуха и отдельно гелия или ксенона. Исследуется влияние неравномерности тепловыделения в сборке на гидравлическое сопротивление, распределение расхода теплоносителя по сечению сборки, теплоотдачу от центрального и периферийных элементов.

Геометрическая модель, используемая в расчетах, повторяет рабочий участок с семиэлементной сборкой [1, 2], в которой пять элементов нагреваются в режиме постоянной плотности тепловыделения, а два рядом расположенных периферийных элемента не нагреваются (см. рис. 1)



Рис. 1. Геометрия моделируемой сборки и поперечное сечение расчетной области в зоне дистанционирующих решеток и между ними, указаны гидравлические диаметры межтрубных квазитреугольных каналов.

Задача решалась в трёхмерной постановке с сопряжённым теплообменом на основе нестационарных осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS). Влияние турбулентности моделировалось с использованием transition-SST модели. В плоскости продольного сечения сборки задавались граничные условия симметрии. На границах между стенками тепловыделяющих элементов и дистанционирующих решёток с газовым потоком задавалось условие равенства тепловых потоков и температур с обеих сторон границы. На обогреваемых внутренних сторонах тепловыделяющих элементов задавалась постоянная плотность теплового потока. На входе в рабочий участок задавались массовый расход, давление газовой смеси и температура, на выходе – давление газовой смеси. Внешняя граница теплоизолирована.

Свойства материала тепловыделяющих элементов и дистанционирующих решёток соответствовали никрому (X20H80). Гелий-ксеноновая смесь – идеальный газ с молекулярной массой 40 г/моль, изобарная

теплоёмкость – 525 Дж/(кг·К), коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности – полиномиальные зависимости от температуры, аппроксимирующие свойств смеси, рассчитанных по методике [3].

На рис. 2 показано характерное поле температур в различных сечениях по длине сборки. Можно отметить, что максимальная температура потока в поперечном сечении наблюдается между центральным твэлом и нагреваемыми периферийными твэлами. Несимметричный нагрев сборки приводит к тому, что центральный элемент не является самым горячим, т.к. омывается холодным газом со стороны неогреваемых твэлов.

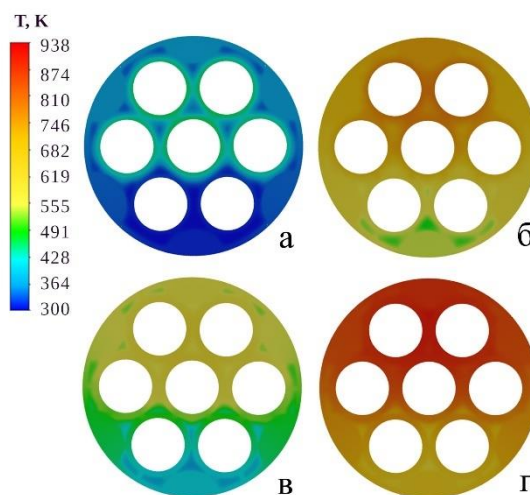


Рис. 2. Распределение температуры стенок твэлов и потока гелий-ксеноновой смеси в различных сечениях по длине сборки: а – 0,2; б – 0,5; в – 0,8; г – 1,08 м.

Список литературы:

1. Витовский О.В., Макаров М.С., Наумкин В.С., Лебеда К.С. Исследование распределения температур нагреваемых труб при течении газа с низким числом Прандтля в стержневой сборке при неоднородном тепловыделении // Тезисы докладов X Всероссийской научной конференции "Теплофизика и физическая гидродинамика". – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН. – 2025. – С. 17.
2. Vitovsky O.V., Makarov M.S. Experimental investigation of the heat transfer under air or helium-xenon mixture flow into the heated 7-rod bundle with spaced grids // J. Eng. Therm. – 2024. – V. 33, No. 2. – pp. 303–315.
3. Tournier J.-M., El-Genk M.S. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Bryton Cycle applications // Energy conversion and management. – 2008. – №49. – P.469–492.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации,
Соглашение № 075-15-2025-572.*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ГЕЛИЙ-КСЕНОНОВОЙ СМЕСИ В НЕОГРАНИЧЕННОЙ СБОРКЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ

Макаров М.С., Лебеда К.С., Наумкин В.С.

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

В последнее время в научной литературе возобновился интерес к вопросам разработки высокотемпературных газовых реакторов, применяемых в цикле Брайтона и обеспечивающих электроэнергией космические аппараты и наземную инфраструктуру малой установленной мощности [1, 2]. Перспективным теплоносителем в таком энергооборудовании считается гелий-ксеноновая смесь с молекулярным весом около 40 г/моль [3]. Разрабатываются концепции атомных станций малой мощности до 3,5 МВт. Термодинамический анализ работы газовой турбины показал, что оптимальная температура на выходе из реактора составляет до 1500 К, степень повышения давления примерно 2,5 [15]. Даны рекомендации по отношению КПД цикла к массогабаритным характеристикам установки. Высокотемпературные газовые реакторы могут обладать достаточно компактными размерами. В работе [5] представлена концепция передвижных и блочных электростанций, работающих на высокотемпературных газовых реакторах, которые помещаются в транспортный контейнер. Реализация приведенных концепций требует решения многих фундаментальных задач, связанных с локальными динамическими и тепловыми эффектами при течении смесового газового теплоносителя в сборках твэлов таких реакторов.

В данной работе приводятся результаты численного моделирования неограниченной внешними стенками сборки цилиндрических твэлов с дистанционирующими решетками (ДР). Сборка продольно обтекается газовой смесью гелия с ксеноном при высоком давлении на входе – 40 атм. Число Рейнольдса варьируется за счет изменения расхода теплоносителя в диапазоне от $1,85 \times 10^3$ до 221×10^3 .

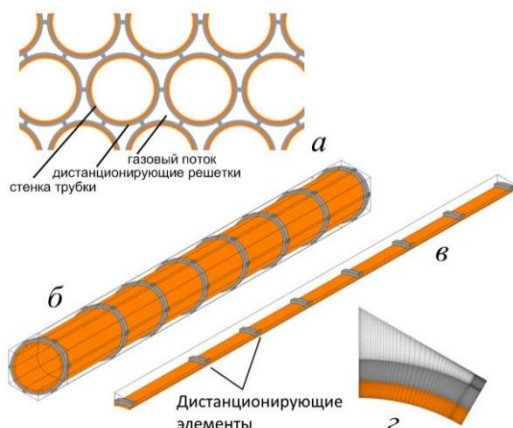


Рис. 1. Форма поперечного сечения бесконечной сборки (а), выделенный элемент сборки с ДР (б), расчётная область (в) и пример расчётной сетки (г), используемой для численного моделирования.

Расчётная область представляет собой один повторяющийся элемент, ограниченный плоскостями симметрии, проведёнными через центр квазитреугольного канала (рис 1). Твэлы представлены в виде трубок с толщиной стенки 0,5 мм с периодически установленными по длине восьмью ДР. Гидравлический диаметр каналов межтрубного пространства и каналов в ДР равны 5,2 мм и 3 мм, соответственно. Стенка решетки, прилегающая к трубке, образует уступ с относительной высотой $h/d_h=0,22$, где h – высота уступа. В начале сборки находился адиабатный участок длиной 80 мм для стабилизации течения.

На рис. 2 показано характерное распределение линий тока и соответствующее поле температур на поверхности твэла в области ДР при числе Рейнольдса $6,03 \times 10^3$. Можно отметить, что наиболее интенсивное вихревое течение формируется не за уступом, а за вертикальным ребром решетки, что приводит к повышению температуры стенки твэла за ребром. Отрывная зона за уступом прижимается к решетке, а её влияние на поле температур уменьшается.

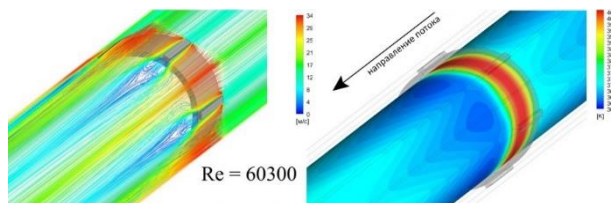


Рис. 2. Распределение температуры стенок тепловыделяющих элементов и потока гелий-ксеноновой смеси.

Список литературы:

1. Драгунов Ю.Г., Каплиенко А.В., Ромадова Е.Л. Работы АО "НИКИЭТ" по космической ядерной энергетике // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129 (4). – с. 199-204.
2. Tianshi Wang, Jinyu Wang, Zhongchun Li, Dongchuan Su, Xiang Chai, Jialong Deng, Hui He, Tengfei Zhang, Xiaojing Liu Experimental investigation on flow and heat transfer characteristics of high temperature helium-xenon mixture in monoblock fuel element // Int. J. Heat and Mass Transf. – 2026. – V. 255, №127809. – 11 p.
3. Tournier J.-M., El-Genk M.S. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Bryton Cycle applications // Energy conversion and management. – 2008. – №49. – P.469-492.
4. Солдатов В.А., Солдатов А.В. Термодинамический анализ космической ЯЭУ с газотурбинной системой преобразования энергии // Атомная энергия. – 2013. – Т.115(3). – с. 141-147.
5. Драгунов Ю.Г., Дунайцев А.А., Ким Д.Д., Кобзев П.В., Кудинов В.В., Куликов Д.Г., Концепция передвижной электростанции малой мощности с быстрым газоохлаждаемым реактором // Атомная энергия. – 2019. – Т.126(1). – с. 3-7.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации,
Соглашение № 075-15-2025-572.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЛЁНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ НА КАПЛЕВИДНОЙ ТРУБЕ

Михальцов Д.А., Куватов А.Т., Сиденков Д.В.

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

Плёночная конденсация пара на горизонтальных трубах широко применяется в кожухотрубных конденсаторах энергетических установок. Как показано в работах [1, 2], при конденсации движущегося пара наблюдаются значительные отклонения от классической теории Нуссельта.

Каплевидные трубы обеспечивают повышенную теплоотдачу за счёт капиллярного эффекта, который «стягивает» плёнку в зоны с малым радиусом кривизны [3].

Цель работы заключается в сравнении двух математических моделей. А именно, универсальную модель А. П. Солодова [4] и более простую модель Никитина–Семенова в модификации Бухтоярова [5].

Модель Солодова [4] разработана для одномерных плёночных течений вдоль проницаемых поверхностей. Она учитывает турбулентность, поперечный поток массы и содержит сложные члены с первой и второй производными кривизны (dk/ds , d^2k/ds^2), что делает её численную реализацию трудоёмкой. Модель Никитина–Семенова [3, 5] напротив, ориентирована на ламинарную конденсацию на гладких некруглых трубах. Она дополняет классическое уравнение Нуссельта градиентом капиллярного давления:

$$\frac{d}{dx}(B(x)\delta^3) = \frac{3\mu\lambda\Delta T}{\rho^2 g r}, B(x) = \cos\beta(x) - \frac{\sigma}{\rho g} \frac{dk}{dx}$$

И благодаря простоте допускает аналитическое решение, что является её ключевым преимуществом.

Расчёты выполнены на языке Python с использованием библиотек NumPy, SciPy и Matplotlib.

Геометрия каплевидной трубы задана кусочно. Большая окружность ($R=10$ мм, $x=0\dots5$ мм), касательная ($x=5\dots35$ мм), малая окружность ($r=5$ мм, $x=35\dots49$ мм). Полупериметр составляет $L=49,06$ мм.

Модель Никитина–Семенова реализована прямым аналитическим интегрированием.

Модель Солодова потребовала численного решения нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения методом конечных разностей с итерационным уточнением на каждом шаге. Начальное условие $\delta(0)$ подбиралось эмпирически из-за сингулярности в стартовой точке.

Теплофизические свойства взяты для воды при 100°C : $\rho=958$ кг/м³, $\mu=2,82\cdot 10^{-4}$ Па·с, $\lambda=0,683$ Вт/(м·К), $\sigma=0,0589$ Н/м, $r=2257$ кДж/кг, $\Delta T=10$ К.

Программа устойчиво работает во всём диапазоне параметров.

Модель Никитина–Семенова даёт средний коэффициент теплоотдачи $\alpha=6,9$ кВт/(м²·К), что на 28% выше, чем у круглой трубы.

Классическое решение Нуссельта даёт 5,4 кВт/(м²·К).

Модель Солодова предсказывает $\alpha=5,7$ кВт/(м²·К), т. е. интенсификацию на уровне 5,5%.

На рис. 1 показано распределение толщины плёнки вдоль контура трубы.

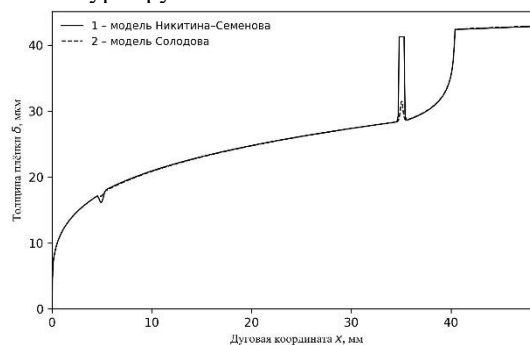


Рис. 1. Распределение толщины плёнки вдоль контура трубы: 1 – модель Никитина–Семенова, 2 – модель Солодова.

В районе 35–40 мм (сопряжение касательной и малой окружности) модель Никитина–Семенова даёт резкое падение толщины плёнки. Это результат сильного градиента кривизны и учёта капиллярных сил. Модель Солодова показывает такой же пик, но значительно слабее, потому что в ней капиллярные члены входят в уравнение с малым коэффициентом.

Кроме того, члены с d^2k/ds^2 в модели Солодова создают численные осцилляции, а начальная сингулярность требует эмпирического выбора $\delta(0)$, что снижает достоверность интегральных характеристик.

Для инженерных расчётов плёночной конденсации на гладких некруглых трубах рекомендуется модель Никитина–Семенова [3, 5]. Она аналитически проста, численно устойчива и даёт физически обоснованную интенсификацию теплоотдачи.

Модель Солодова [4] избыточна для ламинарных плёнок и целесообразна при наличии вдува или отсоса массы, или развитой турбулентности.

Разработанная программа на Python пригодна для оптимизации профиля трубок конденсаторов различной формы и может быть использована в инженерной практике.

Список литературы:

1. Гогонин И.И., Дорогов А.Р., Сосунов В.И. Пленочная конденсация движущегося пара на горизонтальном цилиндре // ПМТФ. 1979. № 1. С. 125–131.
2. Fujii T., Uehara H., Kurata Ch. Laminar filmwise condensation... // Int. J. Heat Mass Transfer. 1972. Vol. 15. No. 2. P. 235–246.
3. Никитин Н.Н., Семенов В.П. Влияние сил поверхностного натяжения... // Проблемы энергетики. 2007. № 11–12. С. 1–8.
4. Солодов А.П. Одномерная модель гидродинамики и теплообмена... // Теплофизика высоких температур. 2024. Т. 62. № 1. С. 71–81.
5. Бухтояров А.С., Шумка Д.П., Сиденков Д.В. Теплообмен при конденсации на каплевидных трубах // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. XXXII междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (26–27 февраля 2026 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2026. — с. 984

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ

Мухарямова Г.И., Ковалева Л.А.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»,
г. Уфа, 450076, Республика Башкортостан, Россия

Аннотация. Исследована проблема транспортировки высоковязких и парафинистых нефтей по магистральным трубопроводам. Выполнено математическое моделирование течения нефтяных сред с учётом изменения реологических параметров под действием высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных полей. На основе экспериментальных данных по динамике вязкости и интенсивности образования асфальто-смоло-парафиновых отложений получены регрессионные зависимости и создан программный комплекс для гидравлических расчётов. Показано, что применение электромагнитной обработки позволяет снизить динамическую вязкость нефти до 2,4 раза и уменьшить объём парафиновых отложений в 2–3 раза. Результаты свидетельствуют о высокой эффективности рассматриваемого метода для повышения пропускной способности и надёжности эксплуатации нефтепроводов.

Трубопроводный транспорт остаётся ключевым способом перекачки нефти в Российской Федерации, однако увеличение доли высоковязких и тяжёлых нефтей создаёт дополнительные эксплуатационные трудности [1]. Традиционные способы улучшения реологических свойств — термическая обработка, применение депрессорных присадок — не всегда обеспечивают достаточную экономическую эффективность [2]. В связи с этим перспективным направлением представляется использование физических методов воздействия, в частности электромагнитных полей высокой и сверхвысокой частоты [3]. Целью настоящего исследования является разработка модели течения высоковязких нефтей в трубопроводах с учётом экспериментально установленных эффектов влияния ВЧ- и СВЧ-полей на их реологические параметры.

Для решения поставленных задач применён комбинированный экспериментально-аналитический подход к изучению реологии нефтей различных месторождений [4]. Образцы подвергались воздействию электромагнитных полей высокой и сверхвысокой частоты с последующим контролируемым охлаждением и измерением вязкости на ротационном вискозиметре [4]. Разработана методика, адаптированная к условиям «горячей» перекачки нефти в магистральных трубопроводах [2]. Математическая модель основана на уравнении Лейбензона и формуле Шухова с учётом температурной зависимости вязкости [5]. Численная реализация алгоритмов выполнена в среде Qt Creator.

Экспериментально установлено, что после обработки ВЧ-электромагнитным полем динамическая вязкость неньютоновских нефтей в диапазоне эксплуатационных температур снижается до 2,4 раза [4]. Период релаксации изменённых реологических характеристик составляет 3–5 суток. Зафиксировано умень-

шение площади петель гистерезиса и снижение предельного напряжения сдвига на реологических кривых. Введён критерий эффективности K , учитывающий компонентный состав нефти и параметры электромагнитного воздействия [3]. Разработан программный продукт «ГРИНТ» для выполнения гидравлических расчётов с учётом эффектов электромагнитной обработки [5].

Анализ полученных данных позволяет предположить, что улучшение реологических свойств обусловлено не только тепловым эффектом, но и структурными изменениями — разрушением высокомолекулярных ассоциатов асфальтенов и смол [3]. Эффективность метода коррелирует с содержанием полярных компонентов в нефти [4]. Сравнение с традиционными технологиями показывает преимущество электромагнитной обработки в части расширения диапазона устойчивой работы трубопроводных систем [2].

Разработана методика электромагнитной подготовки высоковязких нефтей, адаптированная к реальным условиям эксплуатации магистральных нефтепроводов. Экспериментально подтверждено снижение вязкости и предельного напряжения сдвига обработанных сред, что создаёт предпосылки для повышения производительности перекачки. Созданное программное обеспечение позволяет интегрировать эффекты электромагнитного воздействия в инженерные гидравлические расчёты [5]. Перспективы дальнейших исследований связаны с промышленной апробацией метода и оптимизацией параметров генерирующего оборудования.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., проф. Л.А. Ковалевой, а также доцентам В.Н. Кирееву и Р.Р. Зиннатуллину за консультационную поддержку и помощь в организации экспериментальных исследований и создании программного продукта.

Список литературы:

1. Мирзаджанзаде А.Х., Галлямов А.К., Марон В.И., Юфин В.А. Гидродинамика трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — М.: Недра, 1984. — 287 с.
2. Коршак А.А. Специальные методы перекачки: конспект лекций. — Уфа: Дизайн ПолиграфСервис, 2001. — 208 с.
3. Ковалева Л.А. Тепло- и массоперенос многокомпонентных углеводородных систем в высокочастотном электромагнитном поле: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14. — М., 1998. — 30 с.
4. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R. Laboratory Studies on the Separation of Various Oil-Water Emulsions in a High-Frequency Electromagnetic Field // High Temperature. — 2023. — Vol. 61, No. 5. — P. 734–737. — DOI: 10.1134/S0018151X23050218.
5. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. пособие. — М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. — 335 с.
6. Ковалева Л.А. Физические методы улучшения свойств нефти в трубопроводном транспорте // Нефтегазовое дело. — 2023. — № 2. — С. 45–58.

"ЛЕВИТИРУЮЩИЙ" ВИХРЕВОЙ РЕАКТОР

Наумов И.В.^{1,2}, Шарифуллин Б.Р.^{1,2}, Скрипкин С.Г.^{1,2}, Тинтулова М.В.^{1,2}

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

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

Феномен левитации - устойчивого удержания объекта в условиях гравитации без физического контакта, давно привлекает внимание ученых [1-4]. Несмотря на обширные исследования инженерных левитационных устройств, традиционные системы с вращающимся диском и цилиндром оставались в значительной степени неиспользованными для левитационных применений. Вращающийся диск создает интенсивный вихревой поток, который генерирует значительные центробежные поля давления; однако возможность самолевитации таких сосудов ранее не была обнаружена или исследована.

В данной работе мы сообщаем об открытии гидродинамического явления: спонтанной левитации цилиндрического реакторного сосуда, приводимой в движение исключительно внутренним вихревым потоком под вращающимся плоским диском. Реактор механически отделен от вращающегося диска и пассивно реагирует посредством вязкостной связи на вихревое движение жидкости. Сила левитации возникает из-за перераспределения центробежного давления внутри интенсивного вихревого ядра. Этот механизм принципиально отличается от классических ранее изученных случаев, поскольку подъемная сила возникает спонтанно в системе, предназначенной исключительно для перемешивания, а не для левитации.

Эксперименты проводились с использованием газовихревого биореактора «ГВ ФБР-10л» (радиус $R = 95$ мм, высота $H = 300$ мм). Вихревой поток создавался твердым вращающимся диском (см. рис. 1а, б) радиусом 93 мм и толщиной 4 мм, приводимым в движение верхнеприводной мешалкой WOHNS-15 PRO (40–2000 об/мин, разрешение 1 об/мин). Цилиндрический реакторный сосуд был установлен на упорном подшипнике (см. рис. 1а). В качестве рабочих жидкостей использовались вода и водные растворы глицерина. Реакторный сосуд был заполнен на 50% своего объема, что соответствует высоте жидкости $h = 150$ мм и безразмерному заполнению $h/R = 1,58$. Реактор был помещен на электронные весы с верхней нагрузкой (разрешение 1 г), что позволяло измерять осевую нагрузку, передаваемую через упорный подшипник, как функцию скорости вращения диска (см. рис. 1а). Общая масса вихревого реактора, установленного на подшипнике, включая сосуд и жидкость, но исключая опору, находилась в диапазоне 7,9–8,8 кг в зависимости от плотности жидкости.

Вращение верхнего диска инициирует движение жидкости, вызывая сильное завихрение потока. По мере увеличения скорости диска вязкое сдвиговое напряжение на боковой стенке приводит к началу вращения самого цилиндрического контейнера.

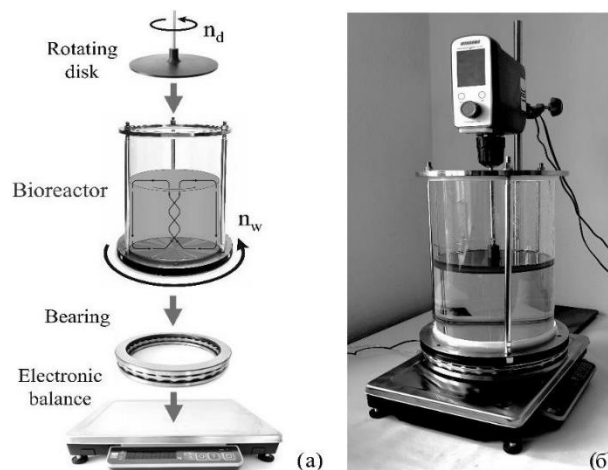


Рис. 1. Схема измерений с реактором, установленным на упорном подшипнике и электронных весах (а), фотография собранной экспериментальной установки (б).

Ключевым результатом работы является обнаружение некомпенсированной подъемной силы, действующей на вращающийся корпус реактора. При вращении диска под ним образуется область пониженного давления, и торoidalный вихрь создает результирующую подъемную силу, действующую на стенки корпуса реактора. При превышении критического значения скорости вращения диска, приводящего к самопроизвольному вращению реактора, измеренная осевая нагрузка на опорный подшипник резко уменьшается и при дальнейшем увеличении скорости вращения диска может быть сведена к нулю, что приводит к отрыву установки от опоры (эффект левитации).

Описанное здесь явление левитации может происходить в широком диапазоне гидродинамических промышленных условий, включающих вихревое течение, где увеличение масштаба может усилить эффект и иметь серьезные последствия.

Список литературы:

1. Brandt E.H. Levitation in Physics // Science. 1989. V. 243, P. 349.
2. Pazos Ospina J.F., Contreras V., Estrada-Morales J., Baresch D., Ealo J.L., Volke-Sepúlveda K. Particle-Size Effect in Airborne Standing-Wave Acoustic Levitation: Trapping Particles at Pressure Antinodes // Phys. Rev. Applied. 2022. V. 18, P. 034026.
3. Rahman A. T. M. A., Barker P. F. Optical levitation using broadband light // Optica. 2020. V. 7, P. 906.
4. Hermansen J. M., Durhuus F. L., Frandsen C., Beleggia M., Bahl C. R. H., Bjørk R. Magnetic levitation by rotation // Phys. Rev. Applied. 2023. V. 20, P. 044036.

Работа поддержана РФФ
(грант № 25-79-30002).

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЯ СЖИМАЕМОГО ГАЗА В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ

Палымский И.Б.

Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
ул. Плеханова, Новосибирск, 630108, Россия

Аналитически в линейной и численно в полной нелинейной постановке исследуется устойчивость равновесия слоя сжимаемого вязкого газа в поле силы тяжести. Задача рассматривается в двумерной постановке. Все горизонтальные и вертикальные границы считаются жёсткими с условиями прилипания для скорости. На всех границах расчётной области задаётся и поддерживается постоянная и одинаковая температура. Газ считается совершенным, задаваемые параметры соответствуют воздуху при нормальных условиях [1].

Предварительные рассмотрения, выполненные без учёта силы тяжести, показали, что решение линейной задачи представлено двумя затухающими модами – монотонной конвективной и быстро осциллирующей термоакустической. При наличии силы тяжести и при отсутствии градиента температуры конвективная мода так же затухает, однако термоакустическая мода становится нарастающей при высоте области больше 21.3 см, порождая неустойчивость статического равновесного решения. Этот вывод подтверждается и дополняется результатами решения системы полных нелинейных уравнений, которые показывают, что неустойчивость статического равновесного решения развивается при любой высоте слоя с уменьшением амплитуды результирующего крупномасштабного течения до нуля при стремлении к нулю высоты области.

Полученное результирующее крупномасштабное течение имеет двухвихревую структуру, где частицы газа опускаются вдоль вертикальных границ и поднимаются в центре области. При этом, в центре области наблюдается некоторый разогрев.

В работе исследуются зависимости числа Рейнольдса и максимальной среднеквадратичной температуры как функций высоты слоя. Показано, что несмотря на крупномасштабность и малую амплитуду, полученное течение имеет сложный характер, так как соответствующий ему временной энергетический спектр сплошной и показывает степенной закон близкий к $-5/3$ при высоте области большей 22.5 см.

Наблюдающаяся неустойчивость статического равновесного решения обусловлена сжимаемостью среды и изменением давления по высоте из-за наличия силы тяжести.

Проблема изучения устойчивости слоя сжимаемого газа в поле тяжести при отсутствии температурного градиента представляет особый практический и теоретический интерес в связи с ее непосредственной связью с вопросами взрывобезопасности хранения топлива в резервуарах. Действительно, взрывоопасная ситуация возникает, когда резервуар почти пуст и оставшееся на дне топливо испаряется, образуя топливно-воздушную (паровоздушную) смесь. Как показывают результаты данной работы, статическое равновесное состояние такой паровоздушной газовой смеси неустойчиво при достаточно большой высоте газового слоя из-за изменения давления с высотой и сжимаемости среды. Возникающие потоки топливно-воздушной газовой смеси обеспечивают перемешивание первоначально слоистой газовой среды, создавая области с возможными взрывоопасными концентрациями топлива. Вопросы взрывобезопасности паровоздушных газовых смесей обсуждались во многих работах, например, ссылки можно найти в монографии [2].

В качестве примера технологического устройства, использующего похожие принципы, укажем на вечно-идущие часы Дж. Кокса [3]. Работающие на суточном перепаде давления, часы показывали время почти две-сти лет (с 1774 по 1964 год) и ни разу не заводились вручную.

Список литературы:

1. Palymskiy I.B. On the gravitational instability of a compressible gas layer // *Int. J. App. Phys.* 2025. V. 10, N 1. P. 139–145.
2. Фомин П.А., Палымский И.Б. Моделирование атмосферных геофизических процессов имеющих взрывную природу / Новосибирск: СГУГиТ, 2024. 168 с.
3. Ord-Hume A.W.J.G., *Perpetual motion: the history of an obsession*. London: George Allen & Unwin Ltd., 1977. 235 p.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЯ ОКОЛОКРИТИЧЕСКОГО ГАЗА

Палымский И.Б.

Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
ул. Плеханова, Новосибирск, 630108, Россия

Аналитически в линейной и численно в полной нелинейной постановке исследуется устойчивость равновесия слоя околокритического сжимаемого вязкого газа в поле силы тяжести. Задача рассматривается в двумерной постановке. Все горизонтальные и вертикальные границы считаются жёсткими с условиями прилипания для скорости. На всех границах расчётной области задаётся и поддерживается постоянная и одинаковая температура, значение которой немного выше критической. На нижней горизонтальной границе области плотность полагается равной критической. Считается, что газ подчиняется уравнению состояния Ван-дер-Ваальса, задаваемые параметры соответствуют диоксиду углерода при нормальных условиях. Подобная постановка задачи, но для совершенного газа, описана в [1].

Обозначим через ε заданное относительное отклонение температуры границ области от критической.

Как и в случае совершенного газа [1], предварительные рассмотрения в линейной постановке, выполненные без учёта силы тяжести, показывают, что полученное аналитически решение представлено двумя затухающими модами - монотонной конвективной и быстро осциллирующей термоакустической. При наличии силы тяжести и при отсутствии градиента температуры конвективная мода так же затухает, однако термоакустическая мода становится нарастающей при высоте области больше критической, причём, значение этой критической высоты пропорционально корню квадратному из ε .

Таким образом, проведённый линейный анализ показывает, что неустойчивость статического равновесного решения развивается в слое любой высоты, если ε достаточно мало.

Этот вывод подтверждается и дополняется результатами решения системы полных нелинейных уравнений, которые показывают, что неустойчивость статического равновесного решения развивается при любой высоте слоя, причём увеличение высоты слоя или/и уменьшение ε приводит к интенсификации результирующего крупномасштабного течения. При этом наблюдается резкий рост значения числа Рейнольдса, среднеквадратичной температуры и вычисленного по пульсациям давления, и вертикальной скорости потока энергии в вертикальном направлении. В настоящее время выполняются расчёты с целью установить степенные законы изменения этих интегральных величин.

Как и в совершенном газе [1], полученное результирующее крупномасштабное течение имеет двухвих-

ревую структуру, но с противоположным направлением вращения, так как теперь частицы газа поднимаются вдоль вертикальных границ и опускаются в центре области. При этом, в центре области наблюдается некоторое охлаждение. В полном соответствии с линейной теорией безразмерное отклонение температуры противоположно по знаку безразмерному отклонению плотности и меньше по модулю в $2/(3 \cdot \varepsilon)$ раз.

Как и в совершенном газе [1], результирующее крупномасштабное течение имеет сложный характер. Временной энергетический спектр кинетической энергии так же сплошной, но степенной закон близок к -2. Полученный степенной закон известен в волновой турбулентности [2].

Наблюдающаяся неустойчивость статического равновесного решения обусловлена изменением давления по высоте из-за наличия силы тяжести и сжимаемостью среды. Кроме того, увеличение высоты области или/и уменьшение ε существенно усиливают интенсивность результирующего крупномасштабного движения.

Проблема изучения устойчивости слоя сжимаемого околокритического газа в поле тяжести при отсутствии температурного градиента представляет особый практический и теоретический интерес в связи с принципиальной возможностью генерации энергии. На самом деле, выбирая высоту слоя околокритического газа достаточно большой и значение ε достаточно малым, можно получить, в принципе, течение любой интенсивности.

Отметим, что технологические устройства, использующие похожие принципы уже существуют, в качестве примера укажем на [3].

Скважина глубиной несколько сотен метров заполняется под давлением газовой смесью на основе CO_2 . При этом, на дне скважины за счёт дополнительного гидростатического давления и подогрева среда находится в околокритическом состоянии. Нагретое рабочее тело поднимается вверх, вращая турбину. Протекающие при этом фазовые переходы увеличивают эффективность энергетической установки [3].

Список литературы:

1. Palymskiy I.B. On the gravitational instability of a compressible gas layer // *Int. J. App. Phys.* 2025. V. 10, N 1. P. 139–145.
2. Nazarenko S. *Lecture notes in physics 825: wave turbulence* / Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011. 278 p.
3. Geng C., Lu X., Yu H., Zhang W., Zhang J., Wang J. Theoretical study of a novel power cycle for enhanced geothermal systems // *Processes*. 2022. V. 10, N. 3. P. 516–537.

ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА НА ЛАМИНАРИЗАЦИЮ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КРУГЛОМ КАНАЛЕ

Пантелеев С.А.^{1,2}, Габдулхакова Д.И.², Дмитрачкова А.П.^{1,2}, Зарипов Д.И.^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр РАН,
ул. Лобачевского 2, Казань, 420111, Россия

² Казанский (приволжский) федеральный университет,
ул. Кремлевская 35, Казань, 420008, Россия

Как известно, увеличение путевых потерь, обусловленных формированием турбулентного режима течения, ведёт к возрастанию энергозатрат на транспортировку жидких и газообразных сред по трубопроводам и, соответственно, к повышению эксплуатационных потерь [1]. Одним из способов снижения этих потерь является формирование ламинарного режима течения при более высоких, закритических числах Рейнольдса. В исследовании [2] авторы продемонстрировали, что ламинарный режим течения при числах Рейнольдса выше критического может быть реализован за счет воздействия на поток синусоидальным изменением среднерасходной скорости, то есть при пульсирующем режиме течения. Было показано, что при определённой комбинации амплитуды и частоты создаваемых пульсаций, ламинарно-турбулентный переход может быть затянута вплоть до числа Рейнольдса $Re = 6000$, тогда как в потоке без пульсаций переход к турбулентности регистрировался уже при $Re = 2000$ (Здесь число Рейнольдса рассчитывается по значению среднерасходной скорости потока). Стоит отметить, что данный способ ламинаризации относится к классу дальнедействующих и оказывает глобальное воздействие на структуру потока во всем течении, что выгодно отличает его от методов, описанных в работе [1], и делает его более перспективным с точки зрения практического применения. Однако, несмотря на обнаруженный эффект ламинаризации, в настоящее время физический механизм подавления турбулентных пульсаций под действием периодических возмущений остается всё еще не раскрытым и требует дальнейших исследований.

В настоящей работе исследуется влияние управляющих параметров пульсирующего потока жидкости (частота и амплитуда пульсаций, число Рейнольдса Re) на режим течения вдоль всего рабочего участка. Для этого был спроектирован экспериментальный стенд, рабочим участком которого является прямолинейный цилиндрический канал длиной $190D$, где D – диаметр канала. С помощью поршня с регулируемой частотой и длиной хода создавались пульсации с заданными параметрами. На практике анализировалось влияние числа Вомерсли $Wo = R\sqrt{\omega/\nu}$ и безразмерной амплитуды пульсаций $\beta = A/U_0$, где $R = D/2$, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота пульсаций, ν – коэффициент кинематической вязкости, U_0 – среднерасходная скорость течения.

Эксперименты проводились с помощью высокоскоростного метода PIV [3] на различных расстояниях

от входа в рабочий участок. Были получены и проанализированы мгновенные двумерные векторные поля скорости, а также осциллограммы продольной и радиальной составляющих вектора скорости в ядре потока.

Результаты настоящего исследования частично подтвердили выводы, представленные в работе [2]: пульсации потока приводят к частичной ламинаризации исходно развитого турбулентного течения, причем при фиксированном числе Вомерсли для трех закритических чисел Re была определена амплитуда пульсаций, при которой степень ламинаризации становилась максимальной для каждого числа Рейнольдса. Дополнительно было обнаружено, что степень ламинаризации зависит от расстояния, пройденного потоком вдоль рабочего участка. На рис. 1 показано, что при одних и тех же условиях течения и воздействия на поток, кинематические характеристики потока, в частности компоненты скорости, могут претерпевать значительные изменения на расстоянии $190D$. Таким образом, привычные для квазистационарного турбулентного течения критерии оценки параметров потока теряют свою актуальность и требуют отдельного детального рассмотрения.

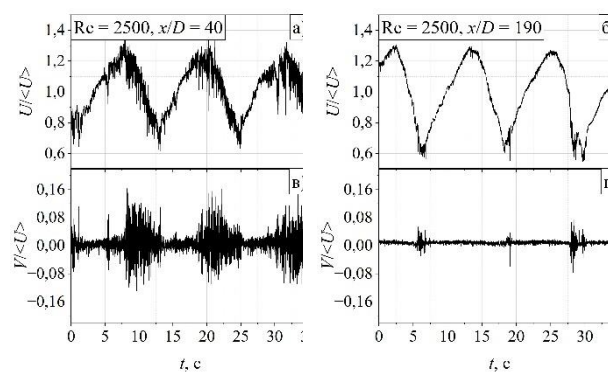


Рис. 1. Осциллограммы продольной (а, б) и радиальной (в, г) компонент вектора скорости в ядре потока при $Re = 2500$ вдоль рабочего участка.

Список литературы:

1. Kühnen J. et al. Destabilizing turbulence in pipe flow // Nature Physics. 2017b. Т. 14. № 4. С. 386–390.
2. Xu D. et al. Transition to turbulence in pulsating pipe flow // Journal of Fluid Mechanics. 2017. Т. 831. С. 418–432.
3. Zaripov D., Li R., Dushin N. Dissipation rate estimation in the turbulent boundary layer using high-speed planar particle image velocimetry // Experiments in Fluids. 2019. Т. 60. № 1.

Работа поддержана РФФ
(грант № 25-29-01702).

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РЕЗЕРВУАРА С МАЗУТОМ

Борисов Б.В., Максимов В.И., Салихов Ф.Ю.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Существенной проблемой использования в качестве топлива мазутов (в том числе анализируемого в данном исследовании) является резкое возрастание вязкости при температурах ниже 40 °С – вплоть до полной потери текучести [1]. Вязкие мазуты требуют предварительного подогрева [2]. Очевидно, что для эффективного прогрева в режиме термогравитационного перемешивания нагревательные элементы необходимо располагать как можно ближе ко дну сосуда. Однако при их расположении в непосредственной близости от дна существенно возрастают тепловые потери через него. Снизить эти потери можно за счет выбора такой высоты установки нагревательного элемента, которая не уменьшает эффективность перемешивания, но обеспечивает лишь частичный контакт прогретой области мазута с дном.

Выбор параметров нагрева проводится численно в среде COMSOL Multiphysics в рамках двухмерного осесимметричного подхода для несжимаемой ньютоновской жидкости. На внешней поверхности моделируется теплообмен с окружающей средой. Схематично область решения с полями температур и скоростей представлена на рисунке 1 для нагревательных элементов виде труб (рис. 1а) и в виде набора плоских концентрических колец (рис. 1б).

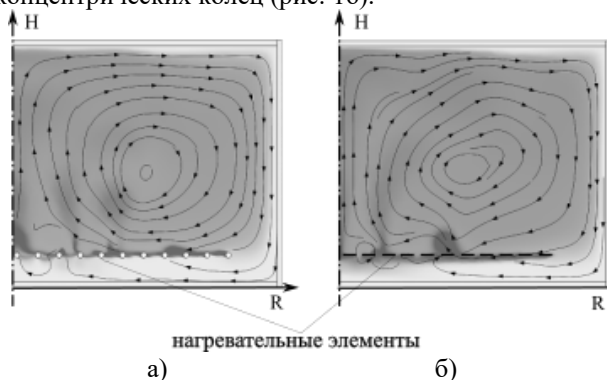


Рис. 1. Область исследования

После сравнения эффективности расчета параметрический анализ проводился для схемы 1б, позволяющая более чем порядок сократить время расчета, а результаты качественно повторяют даже характерные грибообразные тепловые столбы и незначительно отличаются количественно. Анализ проводился для мазута М 100 с начальной температурой 25 °С, размещенного в бетонном сосуде (рис. 2, 3) при мощности нагрева 5 МВт.

Из анализа результатов следует: донная зона со скоростью перемещения мазута не более 1-3 мм/с характеризуется температурой ниже 30-35 °С (рис. 2). При увеличении расстояния от дна размеры донной зоны перестают зависеть от расположения нагревателя и к моменту окончания расчета ее высота стабилизировалась примерно на высоте 1.5-2 м (рис. 2, 3а). При расположении нагревательного элемента ниже

высоты, определенной в данном случае зоны прогрева (рис. 3б) вся область сосуда вовлекается в процесс перемешивания и выравнивание температуры, но излишне возрастают тепловые потери через дно сосуда. При «высоком» расположении нагревателя (3.5м, 5.5м) тепловой поток в дно составляет ~680Вт, а при соприкосновении прогретой зоны с дном он увеличивается в ~10 раз.

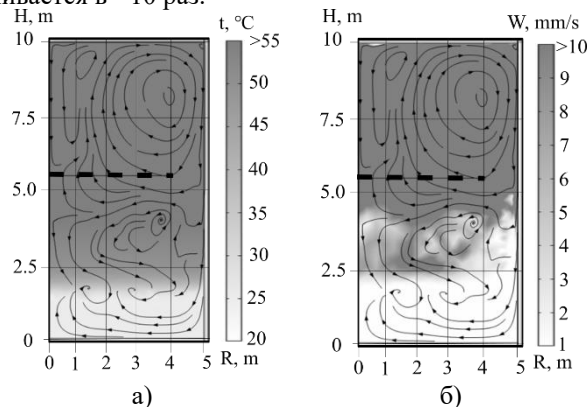


Рис. 2. Поля температур (а) и скоростей (б) к 120 – ой минуте обогрева при расположении нагревательного элемента на высоте 5.5 м от дна.

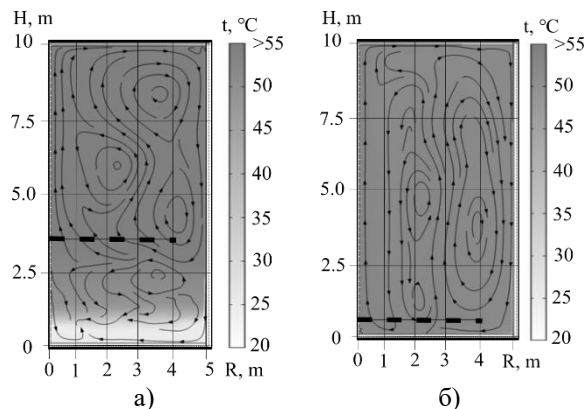


Рис. 3. Поля температур и скоростей к 120 – ой минуте обогрева при расположении нагревательных элементов, соответственно, на высоте 3.5 м (а) и 1.5 (б) от дна.

Таким образом, численные эксперименты показали, что подъем нагревательного элемента на оптимальную высоту (в нашем случае ~ 1.5 м), при которой прогретая область лишь частично касается дна, позволяет сохранить эффективное перемешивание, одновременно снижая тепловые потери примерно на порядок по сравнению с расположением нагревателя в непосредственной близости от дна.

Список литературы

1. Назмеев Ю.Г. Мазутные хозяйства ТЭС – Москва: Издательство МЭИ, 2002.
2. Мутугуллина И.А. Применение подогревателей при использовании мазута / Международный научный журнал «Символ науки» – 2017. – Т. 03-2 – С.92-95.

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ СИСТЕМ РУ БРЕСТ-ОД-300**Вишняков Е.А., Ларин И.А., Сапогов А.В., Сапожников И.С.**Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежала,
пл. Академика Доллежала 1, Москва, 107140, Россия

Для обеспечения работы реакторной установки (РУ) БРЕСТ-ОД-300 в режимах нормальной эксплуатации и с нарушением нормальной эксплуатации предусмотрены воздушные системы: нормального расхолаживания (СНР), охлаждения корпуса блока реакторного (СОКР) и охлаждения камер выдержки негерметичных ТВС (СОКВ), аварийного охлаждения реактора (САОР). Целью проведенного исследования являлся анализ работоспособности воздушных систем при их совместной работе и по отдельности. Проведены расчёты стационарного состояния при условиях нормальной эксплуатации, а также нестационарного состояния для сценариев с пуском реакторной установки и аварийного останова при условии нарушения нормальной эксплуатации для режимов совместной работы СОКР, СОКВ, СНР, САОР и информационных каналов системы аварийного расхолаживания (ИК САОР). Рассмотрены два температурных состояния атмосферного воздуха: плюс 38 °С и минус 55 °С.

Для исследования совместной работы систем СОКР, СОКВ, СНР и ИК САОР использована программа для ЭВМ HYDRA-IBRAE/LM/V1.9 (разработчик ИБРАЭ РАН), так как одномерный код позволяет при меньших трудозатратах в сравнении с программным комплексом, использующим в расчёте трёхмерные сеточные модели, определить значения параметров воздуха в трубопроводах разветвлённых систем. Однако одномерный подход не позволяет получить корректные распределения температур в корпусе блока реакторного (КБР). Поэтому расчёты полей температур в корпусе реактора проведены на модели КБР, составленной с использованием средств программы для ЭВМ STAR-CCM+.

Поиск исследуемых параметров произведен путём итерационных приближений с использованием программы для связки расчетов, реализованной на языке программирования Java. В стационарном приближении на первом шаге в модели КБР и шахты задавалась температура воздуха, а также коэффициенты теплоотдачи по выделенному разбиению в контрольных точках по длине. На втором шаге по окончании стационарного расчета трехмерной модели температуры внутренних поверхностей трубопроводов КБР и шахты передавались в одномерную модель СОКР, построенной средствами программы HYDRA-IBRAE/LM/V1.9, и проводился теплогидравлический

расчет. На заключительном шаге данные по температурам теплоносителя и коэффициентам теплоотдачи в контрольных точках, соответствующих разбиению CFD-модели, возвращались обратно в трехмерную модель. По итогам расчётов с использованием связки 3D-1D определялись новые значения расхода и температуры воздуха на выходе систем, и итерация повторялась до момента, пока отклонения в значениях описанных параметров в новой итерации по сравнению со старой составят менее 1 %.

В дальнейшем с использованием настроенных моделей и насчитанных стационарных режимов проводились расчеты нестационарных режимов с итерационным шагом обмена в одну секунду, что позволило оценить работоспособность воздушных систем при их совместной работе.

По результатам расчетов совместной работы СОКР, СОКВ, СНР, САОР и ИК САОР показано, что работоспособность данных систем при их совместной работе в режимах нормальной эксплуатации и нарушения нормальной эксплуатации обеспечена.

При работе СОКР максимальная температура торцевой поверхности КБР не превышает предельно допустимое значение. СОКВ обеспечивает не превышение максимальной температуры оболочек ТВЭЛ ОТВС выше допустимой. При совместной работе СНР, СОКР, СОКВ и ИК САОР наблюдается обратный ход воздуха в системе охлаждения корпуса реактора, а также в системе охлаждения камеры выдержки. При этом изменение температуры в ОТВС не превышает 4 °С, а работоспособность воздушных систем обеспечивается. В конечном итоге расходы в СОКР, СОКВ и ИК САОР выходят на постоянные расходы с прямым ходом воздуха. Следует также отметить, что работа СНР увеличивает расходы в данных системах по сравнению с результатами, полученными для режимов без работы СНР, что положительно влияет на их работоспособность. Отдельно рассмотрены режимы с аварийным остановом реакторной установки. При совместной работе САОР, ИК САОР, СОКР и СОКВ показано, что последние две негативно влияют на расход системы аварийного охлаждения реактора, но ее работоспособность не нарушается и от реактора отводится необходимая для охлаждения первого контура мощность.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ БЛОКА РЕАКТОРНОГО БР-1200 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 1D-3D ПОДХОДА**Сапожников И.С., Вишняков Е.А., Сапогов А.В., Ларин И.А.**

АО «НИКИЭТ»,

площадь Академика Доллежалея, д.1, корп. 3, Москва, 107140, Россия

Одним из ключевых вопросов проектирования промышленных энергокомплексов с реакторами на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем IV поколения [1] является достоверное описание теплогидравлических процессов в активной зоне и в оборудовании первого контура, где наблюдаются ярко выраженные трёхмерные эффекты тепло- и массопереноса в условиях высоких температур (до 620 °С). Эти эффекты существенно влияют на температурные поля оборудования, теплообмен с конструкциями корпуса реактора, работу пассивных систем охлаждения и общую теплотехническую надёжность установки.

Для анализа теплогидравлики реакторной установки БР-1200 бассейнового типа разработана сопряжённая расчётная модель, объединяющая трёхмерное моделирование в рамках CFD-кода и одномерные расчёты воздушных трактов. В состав трёхмерной части входят свинцовый теплоноситель, корпус блока реакторного с оборудованием, фрагменты шахты и фундаментной плиты. Одномерные модели описывают воздушные тракты теплообменников расхолаживания и системы охлаждения корпуса. Сопряжение реализовано с применением функций пользователя и набора скриптов на языке Java. Такой подход является достаточно универсальным [2] и позволяет калибровать параметры сопряжения наиболее подходящим образом [3, 4].

Такая 1D–3D связка обеспечивает оптимальный баланс между точностью описания и вычислительными затратами. Для расчётов использованы суперкомпьютерные ресурсы, что позволило моделировать длительные переходные процессы при естественной циркуляции теплоносителя продолжительностью более суток.

Комплексная модель позволила:

1. Определить распределение температур в пределах реакторного блока и его конструкций для последующего анализа прочности и термомеханических напряжений.
2. Оптимизировать толщины теплоизоляций, параметры систем охлаждения корпуса и фундаментной плиты, гидравлические тракты первого контура.
3. Рассчитать тепловые потоки между свинцовым контуром, корпусом, шахтой, а также влияние байпасных трактов на циркуляцию и тепловой режим.
4. Разработать рекомендации по размещению контрольно-измерительных приборов и выбору дроселирующих устройств для регулирования расхода в байпасах.
5. Получить замыкающие соотношения для системных кодов анализа безопасности, что значительно повышает достоверность инженерных расчётов.

Особое внимание уделено расчётам переходных процессов нормальной эксплуатации и аварийного расхолаживания. Наиболее трудоёмким оказался аварийный режим длительного отвода остаточного тепловыделения. В качестве исходного события рассмотрено резкое полное прекращение отвода тепла вторым контуром в парогенераторах. В расчётном сценарии аварийная защита активной зоны срабатывает с запаздыванием спустя 37 с, полное отключение насосов происходит спустя 51 с. Открываются клапаны теплообменников в первом контуре и свинец начинает протекать через теплообменники параллельно парогенераторам. Расход в контуре постепенно снижается до 2,9 т/с на протяжении 40 мин. После этого, согласно сценарию, включается в работу система аварийного расхолаживания, один из шести теплообменников не вводится в работу. За счет отвода тепла через воздушные теплообменники в первом контуре развивается устойчивая естественная циркуляция при расходе через активную зону порядка 3 т/с. Спустя 26 ч достигается максимальная среднесмешенная температура на выходе а.з. 611,4 °С, далее температура снижается. Максимальная отводимая теплообменниками мощность составила 17,5 МВт при мощности остаточного энерговыделения 18,7 МВт. Увеличение температуры локализуется в пределах корпуса реакторного блока, температурное возмущение практически не достигает шахты, центрального зала и фундаментной плиты за весь период переходного процесса. Отказ одного из шести теплообменников практически не вносит неравномерность в поля температуры в активной зоне и в металлоконструкциях корпуса в целом.

Полученные результаты обеспечивают основу для оптимизации проектных решений, повышения теплотехнической надёжности и верификации системных моделей безопасности.

Список литературы:

1. E. O. Adamov and A. A. Kashirsky, Fast reactors in the strategic nuclear power development scenarios of the Russian Federation, Atomic Energy 136(2), 215–221 (2024). DOI: 10.1007/s10512-024-01154-z.
2. YAN Y. Development of a coupled CFD–system code capability for nuclear reactor analysis. PhD Thesis, University of Manchester (2011).
3. X. Lu, X. Wang, X. Zheng, T. Ruan, et al., Development and preliminary verification of a coupling simulation for flow and heat transfer in an once-through steam generator, (preprint / conference paper), China Nuclear Power Technology Research Institute. 2024.
4. H. Jordaan, S. Heyns & S. Hosseinzadeh, Numerical development of a coupled 1D/3D CFD method for thermal analysis with flow maldistribution, Journal of Thermal Science and Engineering Applications 13(4) (2025). DOI:10.1115/1.4049040.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ NO_x В БУНЗЕНОВСКИХ ПЛАМЕНАХ АММИАЧНО-ВОДОРОДНОЙ СМЕСИ

Сластная Д.А., Дулин В.М.

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

Переход к низкоуглеродной энергетике усилил интерес к аммиаку как перспективному энергоносителю благодаря развитой инфраструктуре его производства, транспортировки и хранения. Однако его применение в качестве топлива ограничено низкой реакционной способностью и склонностью к образованию NO_x. Обогащение водородом позволяет улучшить горение аммиака, при этом снижение выбросов NO_x часто наблюдается при слегка обогащённых топливом условиях [1]. Достоверное прогнозирование образования NO_x в пламенах NH₃/H₂/воздух существенно зависит от выбранного химико-кинетического механизма. Вместе с тем влияние механизма на структуру пламени, распределение радикалов, промежуточных азотсодержащих соединений и итоговые уровни NO_x изучено недостаточно. В настоящей работе выполнен сравнительный численный анализ влияния детального химико-кинетического механизма на структуру предварительно перемешанного бунзеновского пламени NH₃/H₂/воздух, образование NO_x и распределение ключевых промежуточных соединений.

В работе выполнено систематическое сравнительное численное исследование ламинарных предварительно перемешанных бунзеновских пламен NH₃/H₂/воздух с долей водорода в топливе $x_{H_2} = 0.3$ при коэффициентах эквивалентности $\phi = 1.00, 1.11, 1.22$ и 1.33 , что охватывает стехиометрические и слегка обогащённые топливом условия, представляющие особый интерес для снижения образования NO_x. Расчёты проводились с использованием модуля laminarSMOKE [2], построенного на основе открытой вычислительной платформы OpenFOAM. Использовалась нестационарная осесимметричная постановка, учитывающая влияние плавучести. При одинаковых геометрических и вычислительных условиях детальная химическая кинетика описывалась механизмами Zhang et al. (2021; 38 компонентов / 363 реакции), Mei et al. (2021; 40 компонентов / 257 реакций) и Okafor et al. (2018; 59 компонентов / 356 реакций). Это позволило напрямую оценить влияние выбора механизма на структуру пламени и образование NO_x. Рассчитанные поля OH и NO сравнивались с PLIF-измерениями, представленными Cosway et al. [3], для пламен NH₃/H₂/воздух при близких условиях: $x_{H_2} = 0.35$, $\phi = 0.973$. Для выявления физико-химических причин различий между механизмами были проанализированы пространственно-разрешённые профили температуры, основных компонентов, ключевых радикалов и промежуточных азотсодержащих соединений вдоль линий тока, пересекающих фронт пламени.

Все три детальных химико-кинетических механизма дают сходную общую структуру пламени и сопоставимые максимальные температуры, которые в

основном зависят от коэффициента эквивалентности. При этом рассчитанная высота фронта пламени различается между механизмами примерно на 2 мм. Рассчитанные поля OH и NO качественно согласуются с экспериментальными PLIF-данными по общему пространственному распределению, а также по соответствию основных областей PLIF-сигнала рассчитанным зонам повышенных концентраций. Анализ профилей вдоль линий тока, пересекающих фронт пламени, дополнительно показывает, что локальное положение и внутренняя структура реакционной зоны чувствительны к выбранному кинетическому механизму. При этом реакционная зона систематически смещается вниз по потоку в ряду механизмов Zhang → Mei → Okafor. Хотя все механизмы сходным образом описывают распределения основных компонентов, существенные различия наблюдаются в профилях NH, NH₂, HNO и N₂O. Это приводит к заметному разбросу рассчитанных уровней NO и NO₂. Распределения H, H₂, OH и NO наиболее сильно зависят от коэффициента эквивалентности топлива. В частности, при увеличении ϕ от 1.00 до 1.33 концентрация NO снижается более чем в два раза.

Выбор детального химико-кинетического механизма слабо влияет на общее поле температуры и распределения основных компонентов, но существенно влияет на положение фронта пламени, распределение промежуточных соединений азота и рассчитанные уровни NO_x. Увеличение коэффициента эквивалентности заметно снижает образование NO, что согласуется с литературными данными: слегка обогащённые топливом условия при $\phi \approx 1.2$ обеспечивают минимальные уровни NO без существенного роста остаточного NH₃. Корректное описание азотной химии и её пространственной организации в пламени необходимо для достоверного прогнозирования NO_x и уточнения химико-кинетических механизмов.

Список литературы:

1. Valera-Medina A. et al. Ammonia for power //Progress in Energy and combustion science. – 2018. – Т. 69. – С. 63-102.
2. Cuoci A. et al. Numerical modeling of laminar flames with detailed kinetics based on the operator-splitting method //Energy & fuels. – 2013. – Т. 27. – №. 12. – С. 7730-7753.
3. Cosway B. et al. Investigation of NO production and flame structures in ammonia-hydrogen flames //Journal of Ammonia Energy. – 2023. – Т. 1. – №. 1.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации,
Соглашение № 075-15-2025-572.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГООБМЕНА МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ МАСШТАБАМИ ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ В СТРУЯХ КРУГЛОГО И ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Сорокин М.И.^{1,2}, Токарев М.П.^{1,2}, Дулин В.М.^{1,2}

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

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

Свободные струи являются предметом многих теоретических и экспериментальных исследований [1, 2]. Такие исследования позволяют понять механику массопереноса и турбулентного перемешивания струйных течений для их применения в химических реакторах, газотурбинных и ракетных двигателях. Эффективность смешения струи с окружающей средой во многом определяется динамикой когерентных структур — организованных вихревых образований, играющих ключевую роль в переносе импульса и энергии. Геометрия выходного сечения сопла существенно влияет на формирование и эволюцию таких структур, что делает сравнительное исследование сопел различной формы актуальной задачей.

Исследования проводились для сопел круглого и прямоугольного сечения при числе Рейнольдса $Re = 5000$. Были проведены серии PIV-экспериментов с высоким пространственным разрешением (45 пикселей/мм, размер изображения 16 Мп), обеспечивающим разрешение структур различных масштабов.



Рис. 1. Визуализация формирования и объединения вихрей.

В результате проведенных исследований были получены изображения, демонстрирующие процессы формирования и объединения вихрей (см. рис. 1), методом PIV получены поля скорости, на основе которых с применением POD-разложения (Proper

Orthogonal Decomposition) выполнено тройное разложение полей скорости на среднюю, когерентную и пульсационную (турбулентную) составляющие [3]. Вычислены коэффициенты порождения энергии, характеризующие интенсивность энергообмена между средним течением, когерентными структурами и фоновой турбулентностью (см. рис. 2). Проведен анализ турбулентной кинетической энергии и механизмов её перераспределения между компонентами течения в зависимости от геометрии сечения сопла.

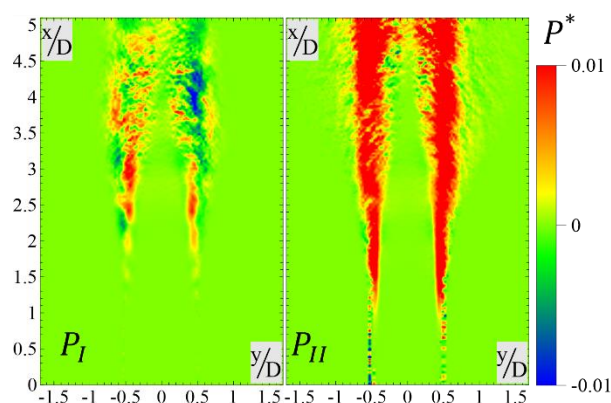


Рис. 2. Порождения, описывающие средний обмен энергией между средней и когерентной составляющей — слева, между средней и пульсационной — справа

Список литературы:

1. Quinn W. R. Turbulent mixing in a free jet issuing from a low aspect ratio contoured rectangular nozzle //The Aeronautical Journal. — 1995. — Т. 99. — №. 988. — С. 337-342.
2. Wu Z. et al. Jet mixing optimization using machine learning control //Experiments in Fluids. — 2018. — Т. 59. — С. 1-17.
3. Reynolds W. C., Hussain A. K. M. F. The mechanics of an organized wave in turbulent shear flow. Part 3. Theoretical models and comparisons with experiments //Journal of Fluid Mechanics. — 1972. — Т. 54. — №. 2. — С. 263-288.

Исследование выполнено за счет государственного задания в ИТ СО РАН (№ 126021217059-6).

ИССЛЕДОВАНИЕ СРЫВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ПРОТИВОТОЧНОЙ ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Тарасов А.В., Колганов П.А., Евдокимов О.А., Веретенников С.В., Иванов Р.И.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
ул. Пушкина 53, Рыбинск, 152934, Россия

Горение на протяжении долгого времени играет ключевую роль в развитии энергетики, транспорта, авиации, а также нефтегазовой отрасли и машиностроения. Эффективность и экологичность устройств для сжигания топлива во многом определяются тем, насколько интенсивно происходят процессы смесеобразования и горения.

Одной из наиболее эффективных схем организации горения является закрутка потока - это обеспечивает быстрое смешение топлива с окислителем и надежную стабилизацию фронта пламени [1]. При противоточном движении увеличивается время пребывания компонентов топливно-воздушной смеси в зоне высокой температуры.

Практическими результатами этого являются существующие прототипы вихревых горелочных, которые используются в качестве воспламенителей, форсуночно-горелочных модулей, малогабаритных реактивных двигателей, плазменных устройств и т.д. Кроме того, экспериментальные исследования показали возможность и эффективность использования в противоточных горелочных устройствах различных видов топлива, таких как твердый пылевидный торф и уголь, жидкий керосин, газообразный пропан, метан, водород, синтез-газ и аммиак [2].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования срывных характеристик горения газообразного топлива в противоточном вихревом горелочном устройстве (см. рис. 1). В качестве топлива был использован газ аммиак, который, до подачи в горелочное устройство, был предварительно смешан с воздухом. Исследование проводилось на вихревой противоточной трубе с диаметром камеры энергоразделения 26 мм.

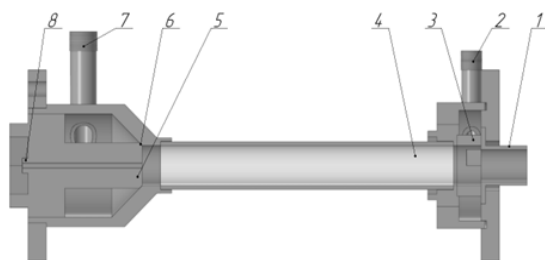


Рис. 1. Вихревое противоточное горелочное устройство:
1 - сопло-диафрагма; 2 - штуцер подвода окислителя (воздуха); 3 - закручивающее устройство; 4 - цилиндрическая вихревая камера; 5 - дроссель; 6 - щель для выпуска периферийного потока; 7 - отвод периферийного потока; 8 - форсунка

При проведении эксперимента щель 6 была закрыта, так как отвод периферийного потока не требовался.

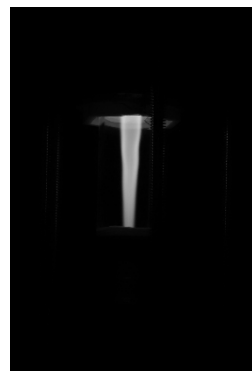


Рис. 2. Комбинированное горение в противоточном горелочном устройстве

При обеднении топливоздушной смеси фронт пламени сдвигается вверх по потоку в пределах приосевого вихря и проскакивает внутрь цилиндрической части горелочного устройства. Таким образом, при бедных режимах горения существует вероятность достижения формирования основной зоны реакции внутри вихревой камеры, которая конструктивно соответствует камере энергоразделения вихревой трубы.

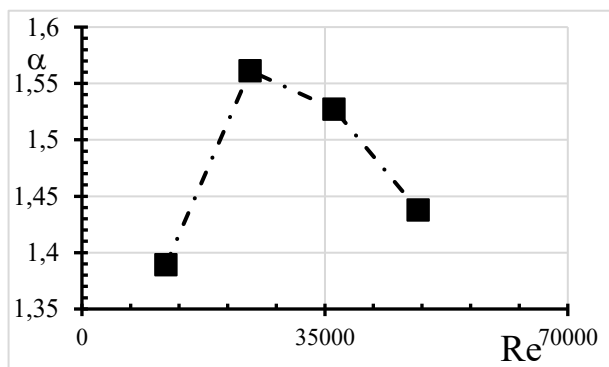


Рис. 3. Границы бедного срыва

Список литературы:

1. Evdokimov O. A., Guryanov A. I., S. V. Veretennikov., D. Prokhorov Transient numerical simulations of a cold-flow bidirectional vortex chamber // Physics of Fluids. 2022. Vol. 34, № 1. P. 015123.
2. Evdokimov O. A. Guryanov A. I. Veretennikov S. V. Emission characteristics of bidirectional vortex combustors operating on gaseous, liquid and pulverized solid fuel // Procedia Environmental Science, Engineering and Management, 2021. – Vol. 8(1). – Pp. 233-241.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ РЕАКТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Тинтулова М.В.^{1,2}, Наумов И.В.^{1,2}

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

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

Закрученные потоки и вихревые технологии применяются во многих технологических процессах [1-3]. Исследование закономерностей ограниченного объема реактора вихревого течения, а также изучение способов управления характеристиками вихревых потоков и процессов переноса позволит повысить энергоэффективность и производительность работы вихревых устройств. Важнейшим практическим направлением является разработка вихревых аппаратов для повышения энергоэффективности и улучшения тепло-массообменных процессов в химических, биологических и энергетических технологиях. В настоящей работе проведено исследование влияния геометрии реактора на процесс интенсификации массообмена.

Эксперименты проводились в открытых реакторах с многоугольными поперечными сечениями (квадрат, пятиугольник и восьмиугольник) (см. рис. 1а). Вихревой поток создавался шестилопастным завихрителем (см. рис. 1б) (диаметр - 63 мм, высота - 13 мм, угол наклона лопастей 45 градусов), приводимым в движение верхнеприводной мешалкой WOHS-15 PRO (40–2000 об/мин, разрешение 1 об/мин). Завихритель располагался на высоте $h = R_s$, что соответствует высоте жидкости равной радиусу вписанной в квадрат окружности ($R_s = 50$ мм). В качестве рабочих жидкостей использовались вода ($\nu_1 = 1$ мм²/с) и водные растворы глицерина с вязкостями $\nu_2 = 3,9$ мм²/с и $\nu_3 = 22,9$ мм²/с. Реакторные сосуды были заполнены на объем $V = 1000$ мл.

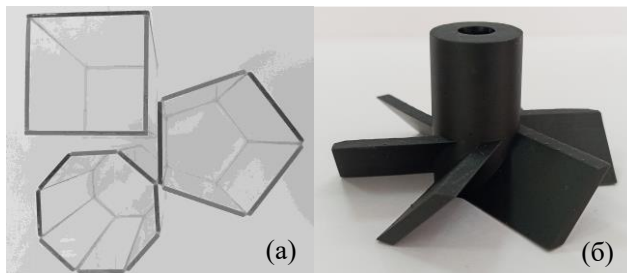


Рис. 1. Фотография стеклянных контейнеров с многоугольным поперечным сечением (а), фотография шестилопастного завихрителя (б).

Измерения времени перемешивания проводились при помощи многопараметрического анализатора жидкости M500T: измерялась электропроводность жидкости при добавлении раствора соли (см. рис 2). 0.5 мл солевого раствора вводилось в закрученный поток вертикально (перпендикулярно поверхности жидкости) в диаметрально противоположной точке от датчика движения (вблизи стенки реактора). Датчик был установлен на высоте $h_d = 1.5R_s$.

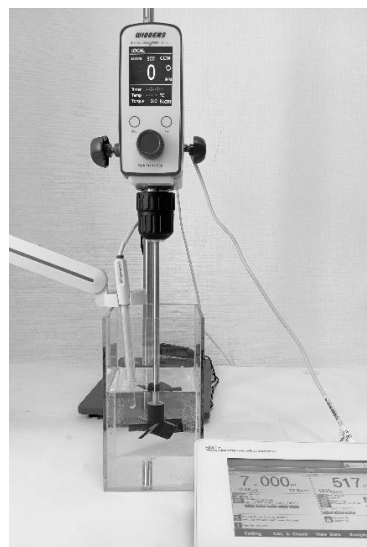


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки.

В ходе работы определены зависимости образования воронки и времени перемешивания от геометрии реактора и скорости закрутки потока. Получено, что в пятиугольном и восьмиугольном реакторе при увеличении скорости закрутки потока появляется воронка, которая растет, пока не доходит до завихрителя. В четырехугольном реакторе воронка гасится о стенки сосуда и не возникает даже при увеличении скорости закрутки. Таким образом, четырехугольный реактор может служить аналогом для цилиндрических реакторов с установленными ребрами для гашения воронки.

При этом, в восьмиугольном реакторе установлено наименьшее время перемешивания, в то время как в четырехугольном реакторе зафиксировано наибольшее время перемешивания для тех же скоростей закрутки. Однако из-за отсутствия воронки в четырехугольном реакторе путем увеличения скорости закрутки можно достигнуть близких значений времени перемешивания к восьмиугольному реактору.

Список литературы:

1. Вихревые явления и их влияние на процессы переноса / под ред. С.В. Алексеенко и И.В. Наумова; Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. – 366 с.
2. Cesmat J., McAndrew J. Characterizing Mixing Dynamics within a Single-Use Stirred Tank Reactor (STR) System // Bioprocessing. 2021. P. 215.
3. Naumov, I. V., Gevorgiz, R. G., Skripkin, S. G., Sharifullin, B. R. Experimental investigation of vortex structure formation in a gas-vortex bioreactor // Therm. Aeromech. 2022. V. 29, P. 719-724.

Работа поддержана РФФ
(грант № 24-19-00233).

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ТЕПЛООБМЕН В ИМПАКТНОЙ СТРУЕ

Федоренко В.А., Терebilкина А.Е., Шаров К.А., Леманов В.В., Лукашов В.В.

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

Импактные струи широко используются для охлаждения теплонапряжённых конструкций в различных областях техники. Разнообразие условий взаимодействия струй с преградой не всегда может быть сведено к «стандартным» граничным условиям I, II или III рода. Удобным инструментом сравнительного анализа теплообмена в различных условиях могут служить критериальные зависимости вида $Nu = Nu(Re, Pr, h/d)$. Такой классический подход может эффективно дополнять численное моделирование актуальных задач, возникающих, например, при проектировании блоков космических аппаратов многоразового пользования [1]. Для этого необходимо корректно учесть влияние граничных условий, в частности оценить влияние переноса тепла внутри преграды. Целью данной работы являлось исследование теплоотдачи при натекании струи на тело, обладающее высокой теплопроводностью.

Экспериментальный стенд включал в себя вертикально расположенную трубку внутренним диаметром $d = 3$ мм и длиной 1 м, из которой вытекает струя воздуха, скорость которой регулируется цифровым расходомером. Струя воздуха налетала нормально на поверхность, которая представляла собой электрически нагреваемую медную пластину. Толщина пластины $\Delta = 50$ мм, диаметр $D = 100$ мм. Расстояние от трубки до преграды в опытах устанавливалось $h = 45$ мм ($h/d = 15$), температура окружающей среды $T_0 = 25^\circ\text{C}$. Температура установки ПИД-регулятора устанавливалась равной 180°C . Мгновенные распределения температуры на поверхности пластины регистрировались с помощью тепловизионной камеры Testo 890-2. Измерения выявили значительные расхождения с известными данными для области критической точки, где фиксировалось «занижение» числа Nu почти в два раза. В данной задаче более представительным может быть средние по площади значения коэффициентов теплоотдачи. Их можно определить, используя следующее выражение [2]: $\overline{Nu} = \frac{\bar{\alpha} \cdot d}{\lambda} = 2 \int_0^1 Nu \cdot r^* dr^*$, где $r^* = r/R$ – безразмерный радиус, Nu – локальное число Нуссельта, d – диаметр трубки, λ – коэффициент теплопроводности воздуха $= 0.025$ Вт/(м·К), α – коэффициент теплоотдачи Вт/(м²·К).

На рисунке 1 представлено сравнение среднего коэффициента теплообмена $\overline{Nu}$, полученного в наших экспериментах, с другими исследователями [2] при разных режимах течения. Режим течения определяется числами Рейнольдса $Re1$ и $Re2$. $Re1$ – критическое число, которое означает начало ламинарно-турбулентного перехода в источнике струи, $Re2$ – обозначает конец ламинарно-турбулентного перехода. $Re1$, $Re2$ оценены с использованием методики [4].

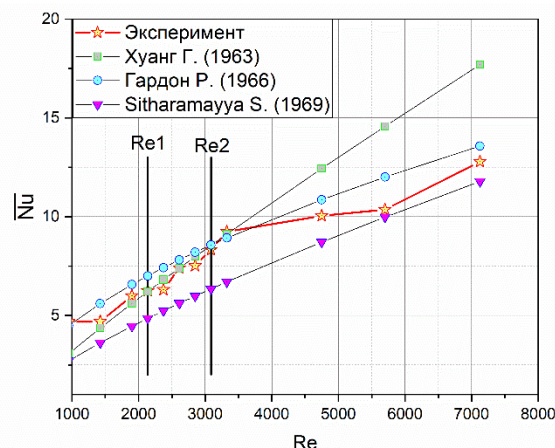


Рис. 1. Зависимость осреднённого по поверхности преграды числа $\overline{Nu}$ от числа Re при охлаждении импактной струей

Рисунок 1 показывает, что полученный в наших экспериментах средний коэффициент теплообмена (Nu) коррелирует с известными данными [2-3] в турбулентном режиме течения импактной струи. В опытах замечен рост интенсивности пульсаций температуры в окрестности критической точки в диапазоне $Re1 \dots Re2$, связанный с ламинарно-турбулентным переходом в трубке, формирующей импактную струю.

С помощью численного моделирования теплообмена в Ansys Fluent определены значения радиальных тепловых потоков внутри преграды, состоящей из пластин с разной теплопроводностью. Полученные данные позволили оценить влияние граничных условий на локальные и средние характеристики теплообмена в импактной струе.

Список литературы:

1. Iannetti A., Girard N., Tchou-Kien D., Bonhomme C., Ravier N., Edeline E. Prometheus, a LOX/LCH4 reusable rocket engine // In Proc. of 7th EUCASS. P. 1–6.
2. Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. М.: Машиностроение, 1977. 248 с.
3. Дыбан Е.П., Мазур А.И. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. Киев: Наукова думка, 1982. 303 с.
4. Леманов В.В., Лукашов В.В., Шаров К.А. Гидродинамическая локализация теплообмена в пристенной области импактной струи газа // Письма в ЖТФ. 2024. Т. 50. № 5. С. 35–38.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации,
Соглашение № 075-15-2025-572.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ С СОТОВЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Филиппов М.В., Терехов В.И., Терехов В.В.

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

Современные технологии пассивной защиты поверхностей включают абляционные покрытия, керамические теплозащитные плитки, многослойные изоляционные системы и композитные материалы с низкой теплопроводностью. Они широко применяются в аэрокосмической отрасли, энергетике и других сферах с высокими тепловыми нагрузками. Однако такие решения имеют ряд недостатков: большие температурные градиенты, сложность изготовления и обслуживания, высокий вес и стоимость жизненного цикла. Одним из наиболее эффективных решений пассивной защиты являются сотовые поверхности, сочетающие низкую теплопроводность, малый вес и высокую механическую прочность.

Одним из ключевых механизмов является эффект проскальзывания потока на сотовых поверхностях. Авторами работы [1] для сотовых поверхностей показано наличие эффекта проскальзывания потока, величина которого может достигать до 30% от скорости в ядре потока. Однако, в работах Терехова подмечено, что при этом пограничный слой вблизи сот оказывается менее заполненным [2-3].

На текущий момент, обзор литературы показывает, что существует много противоречивых данных относительно аэродинамических [4-5] и тепловых [6-7] исследований для сотовых поверхностей, а работы по тепловой защите с помощью сотовых поверхностей практически отсутствуют. В связи с этим, целью данной работы является исследование аэродинамики и теплообмена для сотовых поверхностей в плоских каналах.

Экспериментальный стенд для исследования аэродинамических и тепловых характеристик сотовых поверхностей представлял собой вентилятор, с которого нагнетался поток на аэродинамическую трубу, и далее в рабочий канал. Для создания качественного потока в аэродинамической трубе использовались форкамера, сопло Витошского и рабочий канал. Рабочий канал имел прямоугольное сечение $20 \times 150 \text{ мм}^2$. Поперечные размеры входного канала подбирались из условий обеспечения двумерного течения в центральном продольном сечении канала. На расстоянии 580 мм от входа в канал заподлицо монтировались четыре пластины размером $58.2 \times 182 \text{ мм}^2$ с шестиугольными ячейками. К началу сотовой пластины обеспечивалось развитое турбулентное течение. Высота сот была равной $b = 2.4, 6, 12$ и 24 мм . Они были изготовлены на 3D-принтере из PLA-пластмассы и имели толщину стенок 0.5 мм , длину вписанной окружности $d = 12 \text{ мм}$. Для теплообмена решалась задача с нагревом поверхности и начальным условием $Q = \text{const}$. Для измерения поля температур использовался тепловизор Testo 890-2 с матрицей 640×480 с чувствительностью $0,08 \text{ }^\circ\text{C}$.

Неопределенность измерения температуры составляет $\pm 2 \%$. Суммарная неопределенность определения коэффициента теплоотдачи не превышала 8% при доверительной вероятности 95%. Число Рейнольдса в экспериментах рассчитывалось по гидравлическому диаметру канала и было проварьировано от 5400 до 46000. Для определения гидравлических потерь использовался дифференциальный манометр ДМ-2 с неопределенностью измерения 5%. Исследование аэродинамических характеристик выполнено с помощью двухкомпонентного лазерно-доплеровского анемометра, расположенного на трехкомпонентном координатно-позиционирующем устройстве с минимальным шагом перемещения 0.0125 мм . Неопределенность измерения скорости составила $\pm 0.5 \%$ и пульсаций скорости $\pm 2 \%$ при доверительном интервале 95%.

В результате показано, что для всех глубин сот вблизи стенки наблюдается пониженная осевая скорость и повышенные пульсации. Размер рециркуляционной зоны и длина безвихревого участка увеличиваются с глубиной сот, а интенсивность вихрей снижается. Эффект проскальзывания потока достигает 30 % от максимальной скорости потока. Относительное гидравлическое сопротивление возрастает с увеличением числа Рейнольдса. Коэффициент теплоотдачи возрастает с числом Рейнольдса, но уменьшается при увеличении глубины сот. При максимальной глубине сот ($b = 24 \text{ мм}$) достигается до двадцатикратного снижения коэффициента теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью, что подтверждает их высокие теплозащитные свойства.

Список литературы:

1. Климов А.А., Третьяков С.А. Использование сотовой поверхности для управления пограничным слоем // Теплофизика высоких температур. 2003. Т. 41, № 6. С. 901–906.
2. Терехов В.И., Смольский Я.И., Шаров К.А., Золотухин А.В. Структура пограничного слоя при обтекании сотовой поверхности в плоском канале // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 6. С. 719.
3. Terekhov V.I., Smulsky J.I., Sharov K.A., Zolotukhin A.V. Investigating the influence of cells with various geometric parameters on the air flow in the channel // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 980, № 1. P. 012027.
4. Батт У., Эгберс К. Структура течения на плоской поверхности при наличии гексагональных полостей и выступов // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 6. С. 875–884.
5. Буглаев В.Т., Перевезенцев В.Т., Шилин М.А. Экспериментальное исследование гидравлических сопротивлений в канале с сотовой структурой // Вестник Брянского государственного технического университета. 2012. № 3. С. 84–89.
6. Золотухин А.В. Аэродинамика и теплообмен в каналах с сотовыми поверхностями и вихревыми матрицами : дис. 2022.
7. Буглаев В.Т., Перевезенцев В.Т., Шилин М.А., Шкодин В.М. Экспериментальное исследование теплообмена в канале с сотовой структурой // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 1. С. 72–79.

Данная работа выполнена при поддержке Государственного задания ИТ СО РАН (№ 126021217057-2).

ЕСТЕСТВЕННЫЙ ОБМЕН ГАЗА МЕЖДУ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ И КАНАЛОМ ЧЕРЕЗ ПРОНИЦАЕМУЮ ГРАНИЦУ

Шалаев В.И.

Московский физико-технический институт, Жуковский, Россия

Управление ламинарно-турбулентным переходом (ЛТП) в пограничном слое связано с возможностью улучшения аэродинамических характеристик летательных аппаратов [1]. В настоящей работе, на основе аналитических и численных исследований уравнений Навье — Стокса проведен анализ движения газа в канале с одной проницаемой стенкой под воздействием внешнего квадратичного распределения давления $p_0(x) = p_0 + \chi p_0 + x^2 p_2/2$. Показана возможность естественного обмена (отсоса и вброса газа), с внешним пограничным слоем через границу. На основе конечно-разностного подхода и асимптотического анализа выявлена возможность существования двух различных решений уравнений Навье—Стокса и изучены особенности их поведения.

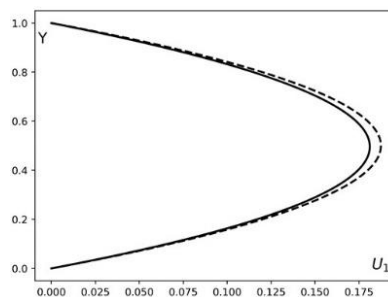
Основное приближение для решения этой задачи основано на теории Стокса и определено так:

$$u(x, y) = u_0(y) + \chi u_1(y); \quad u_0(y) = \frac{p_1}{2\nu} y(y-l),$$

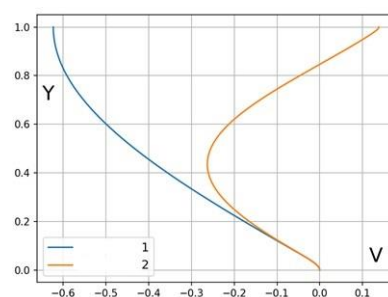
$$u_1(y) = \frac{p_2}{2\nu} y(y-l), \quad v(y) = -\frac{1}{6} \frac{p_2}{\nu} y^2 \left(y - \frac{3}{2} l \right)$$

Здесь $u(x, y)$ и $v(y)$ – продольная и вертикальная скорости. Вертикальная скорость обмена через стенку $y = l$: $v_0 = p_2 l^3 / (12\nu)$; ν – коэффициент кинематической вязкости.

На рис. 1а для числа Рейнольдса $Re = lV_0/\nu = 4.1$ представлены распределения безразмерной функции $U_1(Y) = u_1(y)/V_0$ для $p_2 < 0$ в зависимости от безразмерной координаты $Y = y/l$; $V_0 = \sqrt{l|p_2|}$ – масштаб скорости. Видно, что аналитическое решение (2) (пунктирная кривая) хорошо согласуется с численным решением (сплошная кривая).



a)



b)

Рис. 1. а) Распределения $U_1(Y)$ в приближении Стокса (пунктир) и численное решение (сплошная кривая); $Re = 4.1$; б) Два численных решения для вертикальной скорости $V(Y)$ при $Re = 1000$.

На рис. 1б представлены два численных решения для вертикальной скорости при $Re = 1000$ и $p_2 < 0$; 1 – обычное решение с $v_0 > 0$; 2 – второе, сингулярное при $Re \rightarrow 0$ решение с $v_0 < 0$, для которого поперечная скорость $V(Y)$ изменяет знак внутри канала.

Список литературы:

1. Boyko A.V., Grek G.R., Dovgal A.V., Kozlov V.V. Physical mechanisms of transition to turbulence in open flows. / Moscow: Izhevsk: Scientific Research Center "Regular and chaotic dynamics". Institute of Computer Research. 2005. 304 p.
2. V.I. Shalaev, S.T. Kalugin, G.V. Toloko. Features of gas flow in a channel with a permeable boundary under the influence of an external linear pressure gradient. // Proceedings of the XXVI International Conference "Nonlinear problems of hydrodynamic instability theory and turbulence". Moscow University. 2026. p. 146-150.

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НА КАПЛЕВИДНЫХ ТРУБКАХ

Бухтояров А.С., Шумка Д.П., Сиденков Д.В.

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

Введение. Исследование конденсации пара на трубах важно для проектирования теплообменников. На основе уравнений сохранения массы, движения и энергии разработан алгоритм расчёта теплообмена и гидродинамики для исследования плёночной конденсации на каплевидных трубах. Проведено численное исследование конденсации пентана на пучке труб, геометрия представлена на рис. 1.

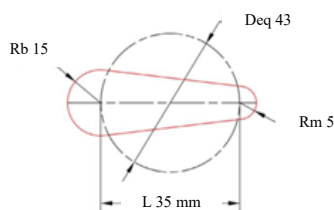


Рис. 1. Геометрия каплевидной трубки

Физическая модель учитывает неравномерное распределение плёнки из-за асимметрии профиля. Локальная толщина плёнки рассчитывается с учётом сил тяжести и поверхностного натяжения. Определены локальные и средние коэффициенты теплоотдачи. Конденсат удаляется с обеих сторон трубы, что улучшает теплообмен. В сравнении с круглой трубой эквивалентного диаметра каплевидная форма даёт истончение плёнки в «хвостовой» части. Результаты полезны для создания более эффективных энергоустановок.

Математический метод.

Описание объекта исследования. С помощью MathCad проведено математическое исследование теплообмена и гидродинамики трубы каплевидной формы. На рисунках 2 и 3 представлены рассчитанные значения толщины пленки и локального коэффициента теплоотдачи.

Уравнение для верхней окружности $s \leq s_{crit}$ было записано формулой

$$D_{-1}(s, \delta) = \frac{\frac{3\mu\lambda\Delta T}{\rho r_s \delta_0} + \delta_0^3 (\rho g * \sin \beta(s) * k(s) + \sigma \frac{dk}{ds})}{3\delta_0^2 (\rho g * \cos \beta(s) - \sigma \frac{dk}{ds})}$$

Уравнение для нижней окружности $s \geq s_{crit}$ было записано формулой

$$D_{-2}(s, \delta) = \frac{\frac{3\mu\lambda\Delta T}{\rho r_s \delta_0} + \delta_0^3 (\rho g * \cos \beta(s) * k(s) + \sigma \frac{dk}{ds})}{3\delta_0^2 (\rho g * \sin \beta(s) - \sigma \frac{dk}{ds})}$$

Сигмоидные функции

$$S_1 = \frac{1}{1 + \exp[-3000 \times (s - 0,0279)]}$$

$$S_2 = \frac{1}{1 + \exp[-3000 \times (s - 0,061)]}$$

Масштаб Нуссельта для верхней части:

$$\delta_s = \left(\frac{3\mu\lambda\Delta TR}{\rho^2 g r_s} \right)^{\frac{1}{4}}$$

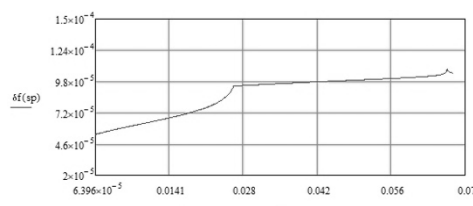


Рис. 2. График изменения толщины пленки конденсата по длине кривой

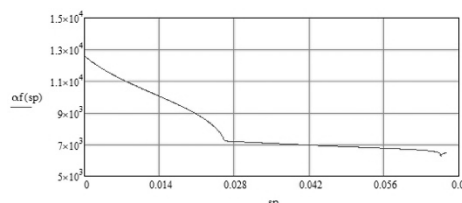


Рис. 3. График изменения коэффициента теплоотдачи по длине кривой

Заключение. Каплевидная форма трубы способствует созданию неравномерного распределения конденсатной плёнки по длине поверхности обтекания, что улучшает теплоотвод по сравнению с круглой трубой. Конденсат эффективно удаляется с обеих сторон профиля. Разработанные модели позволяют точно рассчитывать процесс, что важно для создания более эффективных конденсаторов.

Список литературы

1. Деев Р. Экспериментальное и численное исследование термонапряженного состояния и гидродинамики канального теплообменника тригенерационной установки / Автореф. дисс. канд. техн. наук, М. МЭИ, 2023, 20 стр.
2. Никитин Н.Н., Семенов В.П. Влияние сил поверхностного натяжения на течение пленки и теплоотдачу при конденсации пара на наклонных некруглых трубах. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2007. – № 11-12. – с.3–11.

ДИНАМИКА ВОЗДУШНОЙ ПОЛОСТИ И ВЫСОТА КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ ПРИ ПАДЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОЛЬЦА НА ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОСТИ

Щербаков А.И.

Уральский Федеральный Университет имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина, СУНЦ, ул. Мира 19, Екатеринбург, 620002, Россия

При входе в воду плоского металлического кольца за ним образуется воздушная полость, которая после преодоления инерции схлопывается на определенной глубине (d_s), формируя кумулятивную струю, бьющую вверх. Целью работы является построение теоретической модели динамики свободной поверхности жидкости и определение максимальной высоты такой струи для геометрических параметров кольца (внешний радиус R , внутренний радиус r , толщина $L \ll R$, масса m) и скорости его входа в воду (v_k) и экспериментальной проверки теоретических зависимостей.

На начальных стадиях формирования полости за кольцом каждый горизонтальный слой полости рассматривается как независимо расширяющийся тонкий цилиндр по принципу Логвиновича [1,2].

В каждый момент времени радиальная скорость границы полости для глубины $h < d_r$ (Рис. 1, слева) (из условия несжимаемости воды и работы силы гидростатического давления)

$$|\dot{h}| = \sqrt{gz \frac{h_0^2 - h^2}{h^2 \ln \frac{h_\infty}{h}}} \quad (1)$$

где h_0 — максимальный радиус полости на глубине z , h_∞ — минимальный радиус, на котором скорость потока принята нулевой, усреднённая по всему процессу (в эксперименте ограничена границами сосуда) [1], h — текущий радиус полости.

Однако при $h \rightarrow 0$ формула даёт $\dot{h} \rightarrow \infty$, что физически невозможно. При малых радиусах (на поздней стадии схлопывания) происходит существенный перенос энергии между слоями жидкости, поэтому теорема о кинетической энергии неприменима. В этой связи введены упрощения исходного уравнения [1] для малых радиусов. Тогда оценка конечной скорости схлопывания:

$$|v_{схл}| = \sqrt{v_{крит}^2 + \frac{2gz}{k} \ln \frac{h_{мин}}{h_{крит}}} \quad (2)$$

где $h_{мин}$ — минимальный радиус, при достижении которого поток принимается вертикальным [1], $(h_{крит}; v_{крит})$ — последняя точка $(h; \dot{h})$, при которой не происходит межслоевого переноса энергии (1), k — усреднённый по времени процесса схлопывания полости параметр $\ln \frac{h}{h_\infty}$.

Воспользуемся формализмом [1], приняв наше кольцо за диск эквивалентного радиуса $R_{экр} = \mu \sqrt{R^2 - r^2}$ (параметр $\mu < 1$ описывает разделение потоков внутрь и вовне кольца при его падении в жидкость) и используем тот факт, что $\dot{h}(R_{экр}) = \alpha v_{имп}$. Тогда можно получить оценку для h_0 :

$$h_0 = R_{экр} e^{|k| \frac{\alpha^2 v_{имп}^2}{2gz}} \quad (3)$$

В свою очередь, скорость кольца на глубине z определяется из второго закона Ньютона с учётом присоединённой массы воды [3] и силы сопротивления среды и имеет вид:

$$v_{имп}^2 = v_{np}^2 + (v_0^2 - v_{np}^2) e^{\frac{-2z}{\lambda}} \quad (4)$$

где v_{np} и λ — установившаяся скорость движения и характерная длина торможения соответственно.

На глубине первоначального схлопывания d_s формируется кончик будущей кумулятивной струи. Тогда максимальную высоту её подъёма можно получить из закона сохранения энергии и подстановкой (4) $\rightarrow$ (3) $\rightarrow$ (2).

Экспериментальные исследования высоты кумулятивной струи и динамики схлопывания полости были выполнены с использованием колец с $R_{от}$ 12 до 55 мм, r от 2 до 29 мм, m от 5 до 582 г, для сохранения горизонтальной ориентации диска при падении использовался электромагнит, эксперимент регистрировался с помощью камеры (240 fps). Результаты представлены на рис.1 (справа)

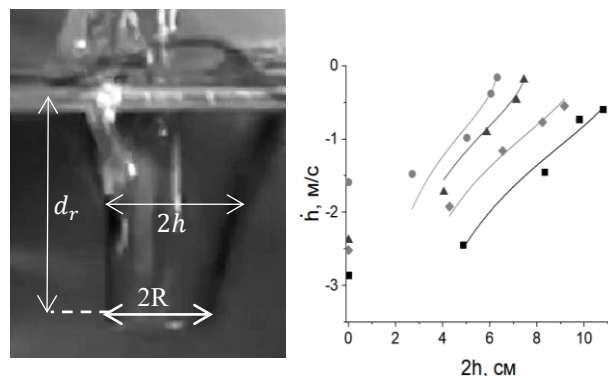


Рис. 1. Слева - формирование полости за кольцом, Справа - зависимость $\dot{h}$ от $2h$ (значения $R_{экр}$: $\bullet$ - 25 мм, $\blacktriangle$ - 27.5 мм, $\blacklozenge$ - 35.9 мм, $\blacksquare$ - 42.3 мм)

Зависимость $\dot{h}$ от h , глубина схлопывания [1] и максимальная высота вылета струи согласуются с теоретическими.

Список литературы:

1. R. Bergmann, D. van der Meer, S. Gekle, A. Van Der Bos and D. Lohse, "Controlled impact of a disk on a water surface: Cavity dynamics.", Journal of Fluid Mechanics, Volume 633, 25 August 2009, pp. 381 - 409
2. T.G. Leighton, "Derivation of the Rayleigh-Plesset Equation in Terms of Volume", ISVR Technical report No 308, January 2007
3. H. Lamb, "Hydrodynamics", Cambridge, Cambridge University Press, 1932, 738.

СЕКЦИЯ 2

Гидродинамика и теплообмен
в многофазных системах и фазовые переходы,
включая нефтегазовые технологии



ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДОСТАВКА АЭРОЗОЛЕЙ В ДЫХАТЕЛЬНЫЕ ПУТИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Антонов Д.В.

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

Ингаляционные пути доставки лекарства широко распространены в современном мире [1]. Для достижения нижних отделов дыхательных путей целесообразным представляется диапазон диаметров аэрозолей от 1 до 5 микрон [2]. Далее характер распределения аэрозолей в дыхательных путях зависит в основном от респираторных усилий. При болезнях органов дыхания сложности применения ингаляционных форм доставки связаны с изменением анатомической структуры, профиля воздушного потока и вентиляционно/перфузионного отношения (рис. 1).



Рис. 1. Основные механизмы депозиции лекарственных препаратов в форме аэрозоля при лечении бронхолегочных заболеваний.

Гидродинамические элементы потоков аэрозолей изучены с помощью оптических методов диагностики газожидкостных потоков на базе фазовой доплеровской анемометрии, теневой съемки и трассерной визуализации (рис. 2). Протестированы три различных ингаляционных устройства доставки лекарственных препаратов: струйный небулайзер с постоянным потоком, дозирующий аэрозольный ингалятор под давлением, ингалятор по типу мягкого тумана.

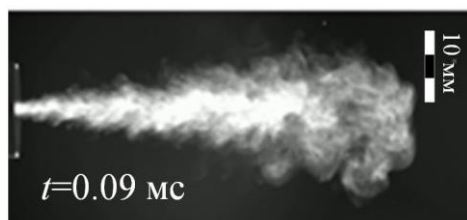


Рис. 2. Видеокадры теневой съемки распыления лекарственного препарата с помощью генератора мягкого тумана.

Разработан математический аппарат для решения системы дифференциальных уравнений теплопереноса, неразрывности и движения. Установлено, что повышение температуры тела усиливает испарение аэрозолей, уменьшая их диаметр и перераспределяя депозицию между отделами дыхательных путей. Показано, что архитектура трахеобронхиального дерева критически влияет на асимметрию осаждения.

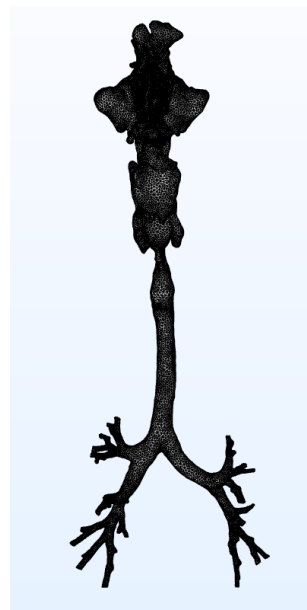


Рис. 3. Сетчатая модель для исследования процессов тепло-массопереноса потоков аэрозолей лекарственных препаратов при адресной доставке в дыхательные пути, построенная на базе результатов компьютерной томографии.

Полученные результаты обосновывают необходимость персонализации ингаляционной терапии на основе анатомии пациента, что открывает возможности для повышения эффективности лечения бронхолегочных заболеваний.

Список литературы:

1. Авдеев С.Н. Хроническая обструктивная болезнь легких: обострения // Пульмонология. 2013. Т. 3. С. 5–19.
2. Ainetdinov R.M., Antonov D.V., Avdeev S.N., Cao B.-Y., Kerimbekova S.A., Liu N., Merzhoeva Z.M., Nagatkina O.V., Nikitina L.Yu., Rybdylova O., Sazhin S.S., Sokolova E.S., Strizhak P.A., Suvorova O.A. Achievements and challenges of targeted drug delivery to a human respiratory tract: Bridging traditional and novel approaches to modelling and clinical needs // J. Aerosol Sci. 2026. V. 191. P. 106706.

Работа поддержана РФФ
(грант № 24-45-00012).

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ НА ПРОЦЕСС РАСПЫЛА ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ

Божеева Д.М.^{1,2,3}, Кузнецов В.А.^{1,2,3}, Минаков А.В.^{2,3}, Дектерев А.А.^{1,2,3}

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

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

³ Сибирский федеральный университет,
пр. Свободный 79, Красноярск, 660041, Россия

Эффективность сжигания и стабильность горения водоугольной суспензии (ВУС) зависят от характеристик распыла топливной струи, поскольку это влияет на полноту выгорания топлива, температуру в камере и уровень образования вредных выбросов [1,2]. Одним из перспективных направлений в энергетике является технология сжигания топлива в условиях повышенного давления с целью интенсификации процесса горения и сокращения габаритов оборудования. Таким образом, при сочетании двух технологий (капельно-факельное сжигание ВУС и сжигание под давлением) актуальной задачей является исследование процессов распыла суспензионного топлива под давлением в камере.

В данной работе представлено численное исследование влияния избыточного давления (от 1 до 22 бар) в камере на процессы распыла водоугольной суспензии. Расчёты проведены для трёхпоточной форсунки (см. рис. 1). Ключевой особенностью форсуночного устройства является организация подачи первичного газа (окислителя) через кольцевое сопло, формирующее высокоскоростную струю, направленную под углом к оси. Взаимодействие данной струи с низкоскоростным потоком ВУС инициирует механизмы первичного разрушения жидкой фазы, в которых также принимает участие вторичный поток окислителя, обеспечивающий растекание жидкости по поверхности стенки внутри форсунки (см. рис. 1).

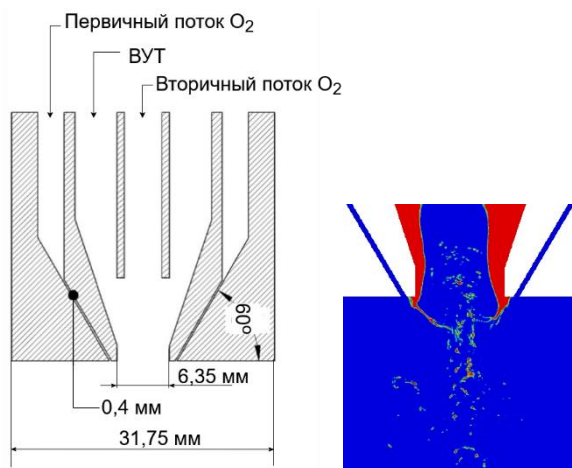


Рис. 1. Схема пневматической форсунки и структура течения.

Моделирование двухфазного течения проведено с использованием гибридного Эйлераво-Лагранжева

подхода (ELSA — Eulerian–Lagrangian Spray Atomization), сочетающий в себе метод объёма жидкости (VOF) и модель дискретной фазы (DPM). Выбор данной методологии обусловлен необходимостью детального разрешения процессов первичного распада топливной струи. В рамках подхода ELSA расчётная область условно разделена на две зоны: в непосредственной близости от сопла, течение моделируется в Эйлеровом приближении с использованием VOF-метода. По мере удаления от среза форсунки, когда фрагменты жидкости приобретают форму, близкую к сферической, осуществляется переход к Лагранжеву описанию траекторий отдельных частиц в рамках DPM-подхода. Такое сочетание методов позволяет установить баланс между точностью моделирования начальных стадий распада и скоростью расчёта. При описании течения окислителя используется модель сжимаемого идеального газа. Предложенная численная методика была протестирована в работах [3,4]

В рамках проведённого исследования выполнен анализ влияния избыточного давления в камере на структуру газожидкостного течения, кинематику распада струи и интегральные параметры распыла ВУС. Установлено, что при повышении давления от 1 до 22 бар изменяется структура течения двухфазного потока и увеличивается средний размер распыляемых капель при неизменных массовых расходах топлива и окислителя. Результаты исследования могут быть использованы для оценок при разработке энергетического оборудования по сжиганию ВУС под давлением.

Список литературы:

1. Solomatin Y, Shlegel NE, Strizhak PA. Atomization of promising multicomponent fuel droplets by their collisions. *Fuel* 2019;255:115751.
2. Alekseenko S, Anufriev I, Dekterev A, Kuznetsov V, Maltsev L, Minakov A, et al. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel. *Int J Heat Fluid Flow* 2019;77:288–98.
3. Kuznetsov V.A., Bozheeva D.M., Dekterev A.A., Minakov A.V., Maltsev L.I. Numerical study of slurry fuel atomization processes based on the Coanda effect in a pneumatic nozzle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 260. 2026
4. Kuznetsov V.A., Bozheeva D.M., Minakov A.V. Numerical study of oxy-flame-droplet combustion of suspension fuel prepared from waste. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 289. 2026.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 25-79-30002,
<https://rscf.ru/project/25-79-30002/>

ИСТЕЧЕНИЕ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ДВА ОДИНАКОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛА

Бусов К.А.

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

Актуальность изучения потоков жидкости и газа обусловлена их широким использованием во многих технических устройствах. Достаточно подробно исследовано поведение холодных [1] и вскипающих струй перегретых жидкостей [2,3], истекающих через один короткий канал. Значительно меньше имеется опытных данных по истечению перегретой жидкости через два и большее число каналов.

В данной работе представлены результаты экспериментального изучения вскипания перегретой дистиллированной воды при ее истечении из камеры высокого давления через два одинаковых цилиндрических канала, которые просверливались в миллиметровой пластине из нержавеющей стали. Диаметр каждого канала равнялся $d=0.3$ мм. Исследования проводились в широком интервале температур от $T_s=110$ °C до $T_s=310$ °C при изменении давления от $p_s=0.1$ МПа до 9.9 МПа.

Цель данного исследования заключалась в изучении изменения формы струи, устойчивости течения и ее капельного состава.

При небольших перегревах $\Delta T < 70$ °C ($\Delta T = T_s - T_b(p_a)$, где T_s – температура жидкости на линии насыщения, T_b – температура кипения жидкости при атмосферном давлении) у каждой струйки сохранялся сплошной цилиндрический участок, окруженный облаком испарения. Истечение перегретой жидкости в этом случае не отличалось (кроме проявления испарения с поверхности) от вида не вскипающих струй.

При температурах $T_s=170$ °C и $T_s=180$ °C возникали пульсации жидкостных стержней струй (см. рис. 1). В процессе такого течения наблюдалось как движение двух разделенных струек (см. рис. 1а,с), так и слияние их в один поток (см. рис. 1б,д).

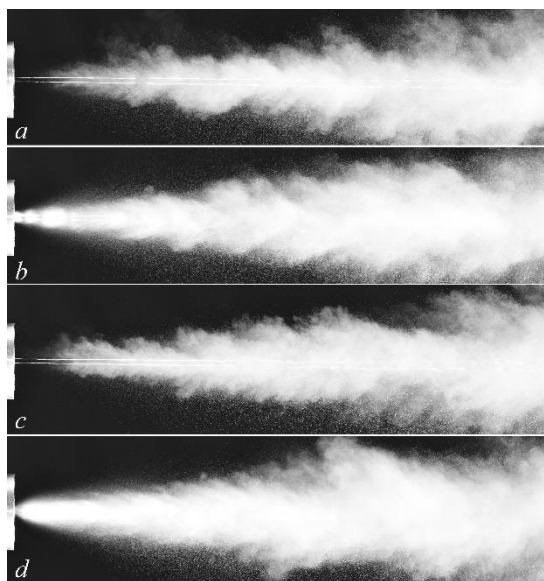


Рис. 1. Форма струи вскипающей воды при температуре $T_s=180$ °C в различные моменты времени.

Данное неустойчивое истечение метастабильной воды связано с проявлением актов вскипания в объеме жидкости, которое происходит при переходе от режима интенсивного испарения к режиму вскипания [4].

С дальнейшим ростом температуры исследуемой жидкости наблюдалось истечение двух струй как единого потока, принимающего пирамидальную форму с растущим углом раскрытия. В ходе проведенных экспериментальных исследований было установлено, что изменение угла раскрытия струи сильно зависит от ориентирования каналов. Подробнее об этом написано в работе [5].

Изучение микроскопическим методом (описание метода изложено в работах [6,7]) капельного состава факела распыла струи вскипевшей жидкости показало, что с увеличением начальных термодинамических параметров (давление, температура) теплоносителя уменьшается доля крупных капель и значительно возрастает количество мелких частиц, что приводит к более однородному (по размерам) и мелкодисперсному диспергированию рабочей среды.

Таким образом, исследования показали, что при истечении жидкости через два одинаковых цилиндрических канала при различных перегревах наблюдаются определенные особенности в форме и угле раскрытия вскипающей жидкости по сравнению со случаем истечения метастабильного вещества через один канал. Это позволяет предлагать новые решения в задачах регулируемого распыления и говорить о более широких возможностях использования перегретых жидкостей в различных устройствах, создающих объемное, однородное и мелкодисперсное ее дробление.

Список литературы

1. Lefebvre A. H., McDonell V. G. Atomization and Sprays, CRC Press, 2017.
2. Исаев О. А., Неволин М. В., Скрипов В. П., Уткин С. А. Реакция струи вскипающей жидкости // ТВТ. 1988. Т. 26. №. 5. С. 1028-1030.
3. Pavlenko A. N., Koverda V. P., Reshetnikov A. V., Surtaev A. S., Tsoi A. N., Mazheiko N. A., Busov K. A., Skokov V. N. Disintegration of Flows of Superheated Liquid Films and Jets // Journal of Engineering Thermophysics. V. 22, № 3. 2013. P. 174–193.
4. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
5. Busov, K.A. Boiling-Up of Two Jets of Superheated Water // J. Engin. Thermophys. 2025. V. 34. № 2. p. 312–320.
6. K. A. Busov, The Effect of Boiling-Up on the Shape and Droplet Size of a Jet of Superheated Water Discharged Through a Semi-Cylindrical Nozzle // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2022. 136. 106199.
7. Busov, K.A., Mazheiko, N.A., Shurupov, V.A. Flash Boiling of Water at Discharge through a Short Oval Nozzle // J. Engin. Thermophys. 2025. V. 34. № 3. 567–579.

Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда № 25-29-01039,
<https://rscf.ru/project/25-29-01039/>.

УСТАНОВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Валиуллина В.И., Галеев Р.Р., Зиннатуллин Р.Р.

Уфимский университет науки и технологий,
Заки Валиди 32, Уфа, 450076, Россия

Многофазные дисперсные системы, возникающие в процессах добычи, подготовки и переработки нефти, отличаются высокой устойчивостью, обусловленной наличием природных поверхностно-активных веществ, минеральных включений и сложной коллоидной структуры. Прочные межфазные оболочки и адсорбционные взаимодействия препятствуют коалесценции и разделению [1]. Традиционные методы (нагрев, химическая обработка, центрифугирование) часто оказываются энергоёмкими и малопроизводительными, что стимулирует интерес к электромагнитным полям (ЭМП) для управления структурой дисперсий.

Множество исследований [2-3] показывают, что электромагнитное поле способно существенно влиять на фазовое состояние, структуру и транспортные свойства дисперсных систем. Воздействие реализуется через межфазную поляризацию, индуцированное дипольное взаимодействие, изменение межфазного натяжения и формирование анизотропных агрегатов. Несмотря на значительный объём работ, посвящённых электрореологическим и магнитным средам, вопросы целенаправленного применения электромагнитного поля для интенсификации процессов разделения сложных дисперсных систем остаются недостаточно изученными. Решение этих задач требует дальнейшего систематического анализа с учётом термодинамических, кинетических и реологических факторов.

Целью настоящего исследования является определение условий оптимального воздействия ЭМП на трёхфазные эмульсии для их эффективного разделения, а также определение роли механических примесей в формировании диэлектрического отклика.

В качестве объектов исследования были выбраны модельные трёхфазные эмульсионные системы типа «масло + вода + механические примеси», приготовленные на основе трансформаторного масла (вязкость 31,6 мПа·с). Для стабилизации системы использовалось маслорастворимое поверхностно-активное вещество (ПАВ) моноолеат сорбитана (Span80), размеры молекул которого соизмеримы размерами молекул асфальтенов. В качестве механических примесей использовалась глина. До начала экспериментов глина, представляющая собой частицы чешуйчатой формы коэффициентом полидисперсности $P=0,13$, смачивалась в дисперсионной среде. Твёрдые частицы значительно повышают прочность пограничного слоя, предотвращая слипание капель, делая эмульсию более стабильной. Средний размер капель дисперсной фазы в исходной эмульсии составил $r_{cp} = 3,4$ мкм.

Исследуемый образец помещался в рабочую ячейку, после чего подвергался воздействию неоднородного ЭМП с напряжением $V_{pp}=100$ В и частотой $f=0,0001\div 15$ МГц. Длительность воздействия составляла $t=60$ минут. По завершении электромагнитной

обработки поле отключалось, и дальнейшее разделение эмульсии происходило под действием гравитационных сил.

Результаты исследования изменения микроструктуры эмульсий после воздействия электромагнитным полем определенной частоты из частотного диапазона 10 Гц – 10 МГц показали, что при воздействии ЭМП наблюдается укрупнение капель воды и в зависимости от частоты поле по-разному влияет на микроструктуру эмульсии (см. рис. 1).

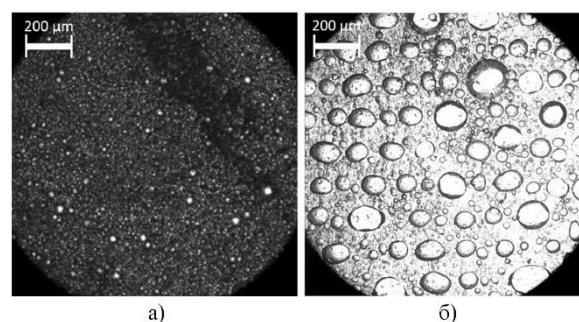


Рис. 1. Фото исходной эмульсии (а) и эмульсии после воздействия ЭМП частотой $f=1$ кГц

Результаты исследований показали, что разделение эмульсионной системы наблюдается при совпадении действующего поля с частотой диэлектрической поляризации полярных молекул эмульсий. Наиболее эффективное разделение фаз происходит при воздействии электромагнитного поля на молекулы глины. Это приводит к отделению глины со структуры бронирующих оболочек и к ослаблению эмульсионной системы. При частоте электромагнитного поля частотой 10-40 кГц происходит поляризация глобул воды с бронирующими оболочками, приводящая к образованию коагуляционных цепочек. При частоте поля из высокочастотного диапазона (7-10 МГц) поляризуются полярные молекулы ПАВ. В случае нефти это асфальтены и смолы. Чем выше содержания в нефти асфальтенов и смол, тем эффективнее будет действовать электромагнитное поле высокой частоты.

Список литературы:

1. Fu L. et al. Application of Pickering emulsion in oil drilling and production // *Nanotechnology Reviews*. 2021. V. 11, N.1. P.26–39.
2. Kovaleva L. et al. Influence of radio-frequency and microwave electromagnetic treatment on water-in-oil emulsion separation // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. V. 614. P. 126081
3. Jahromi A. F., Elektorowicz M. Electrokinetically assisted oil-water phase separation in oily sludge with implementing novel controller system // *Journal of hazardous materials*. 2018. V. 358. P. 434-440

Работа поддержана РНФ
(грант № №25-27-00181).

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ВСПЛЫТИЯ ПУЗЫРЬКОВ В ПОКОЯЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ОТРЫВЕ ОТ ОДИНОЧНОГО КАПИЛЛЯРА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Воробьев М.А.^{1,2}, Кархов А.О.^{1,2}

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

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

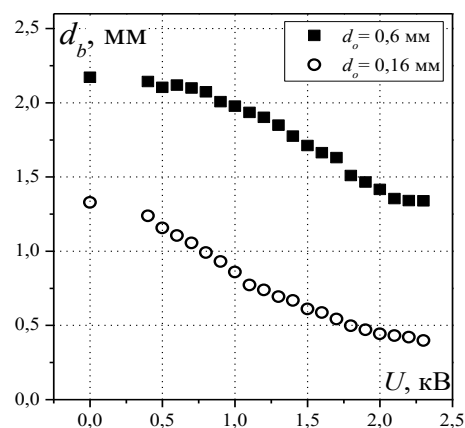
Размер газовых пузырьков является критическим фактором, определяющим интегральные и локальные параметры двухфазных потоков [1]. Введение газовой фазы в поток жидкости и соответственно создание пузырьковой газожидкостной смеси возможно несколькими способами, например: барботирование газа через пористые перегородки; использование устройств фокусировки потока; вдувание газа через отверстия или капилляр в поток жидкости. Приведенные методы непригодны для создания монодисперсных смесей с высоким газосодержанием и малыми размерами пузырей. Барботирование не обеспечивает монодисперсности из-за распределения размеров пор; устройства фокусировки потока не могут обеспечить высокое газосодержание; а введение газа в поток жидкости через капилляры, как показано в [2], сталкивается с трудностями в генерации малых пузырьков - увеличение расхода газа через капилляр приводит к коалесценции пузырей вблизи него. Для уменьшения диаметра отрыва пузырьков без уменьшения расхода газа требуется дополнительный механизм, способствующий быстрейшему отрыву пузырька от капилляра. Одним из решений является приложение неоднородного электрического поля, которое индуцирует объемную силу в диэлектрической среде с неоднородностью диэлектрической проницаемости [3].

В данной работе изучается динамика формирования и всплытия газовых пузырьков при отрыве от капилляра в покоящейся жидкости под действием неоднородного электрического поля. Экспериментальная установка состояла из стеклянного аквариума, заполненного этанолом, и была снабжена двумя электродами: капилляром для подачи газа на дне и коаксиально расположенным медным кольцевым электродом над ним. Между электродами поддерживалось напряжение до 2,3 кВ. Эксперименты проводились на капиллярах разного размера (внутренние диаметры 0,56 и 0,17 мм). Образование пузырьков регистрировалось с помощью высокоскоростных камер в проходящем свете. Полученные видеоматериалы обрабатывались автоматически. Для распознавания пузырьков использовалась модель нейронной сети Mask R-CNN [4]. Первичные данные, полученные нейронной сетью, обрабатывались и анализировались при помощи алгоритма, написанного в среде Python.

Результаты исследования показывают, что характер образования пузырьков под воздействием электрического поля отличается от наблюдаемого без поля. Экспериментально продемонстрировано, что

увеличение напряжения приводит к уменьшению периода отрыва пузырьков и их диаметра (см. рисунок). Показано, что с увеличением приложенного напряжения форма пузырька значительно изменяется — он расширяется вертикально и сжимается радиально. При подъеме пузырьки не следуют друг за другом в вереницей, как это обычно происходит в отсутствие поля, а разлетаются в конус. Увеличение вертикальной и радиальной компонент скорости пузырьков вблизи капилляра позволяет им избежать столкновений и слияния. Эти комбинированные эффекты позволяют эффективно получать монодисперсные газожидкостные смеси с пузырьками субмиллиметрового размера.

Эти результаты демонстрируют потенциал неоднородных электрических полей как инструмента для активного управления параметрами пузырьковых потоков.



Список литературы:

1. Valukina N.V., Koz'menko B.K., Kashinskii O.N., Characteristics of a flow of monodisperse gas-liquid mixture in a vertical tube // J. Eng. Phys. 1979. V. 36, P. 462–465.
2. Vorobyev M., Lobanov P., Chinak A., Kashinsky O., Effect of flow direction and capillary orientation on the bubble detachment diameter in liquid cross-flow // Exp. Comput. Multiph. Flow. 2025. V. 7, P. 323–335.
3. L.D. Landau, J.S. Bell, M.J. Kearsley, L.P. Pitaevskii, E.M. Lifshitz, J.B. Sykes, Electrodynamics of continuous media, Elsevier, 1984.
4. Kim Y., Park H., Deep learning - based automated and universal bubble detection and mask extraction in complex two - phase flows // Sci. Rep. 2021. V.11, P. 1–11.

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

КВАЗИСТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ РОСТА ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В МАГМАТИЧЕСКОМ РАСПЛАВЕ С НЕОДНОРОДНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ДИФфуЗИИ

Давыдов М.Н.^{1,3}, Чернов А.А.^{1,2}

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

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

³ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия

В последнее время ведутся активные исследования, посвященные зарождению и росту пузырьков в магматических расплавах – элементарному акту дегазации, определяющей реологические свойства магмы в процессе извержения и его характер [1]. В отличие от обычных жидкостей, дегазация магм протекает принципиально иначе из-за высокой массовой доли растворённых летучих компонентов и экспоненциальной зависимости вязкости от их концентрации. Следствием этого является то, что в процессе дегазации вязкость магмы может возрастать на порядки, что порождает сложные и уникальные физические явления.

Для описания роста одиночного газового пузырька в магме требуются так называемые гибридные модели, одновременно учитывающие динамические и диффузионные механизмы. Как правило, подобные задачи решаются только численно. Авторами предложен новый подход, основанный на существовании квазистационарного состояния для концентрационного поля растворённых летучих компонентов. Это позволяет редуцировать исходную краевую задачу с подвижной границей к интегро-дифференциальному уравнению, удобному для параметрического анализа, в том числе с учетом бародиффузионного эффекта, который может быть существенен вследствие формирования вокруг пузырька большого градиента давления, обусловленного большим градиентом вязкости.

Однако градиент вязкости порождает не только бародиффузию, но и пространственную неоднородность коэффициентов диффузии и бародиффузии, которые обратно пропорционально зависят от вязкости. Этот эффект, как правило, игнорируется в существующих моделях, но, как показано в настоящей работе, он оказывает заметное влияние на динамику роста пузырька, причём на всех стадиях, включая асимптотическую диффузионную. Таким образом, целью настоящей работы является построение модели роста газового пузырька в магматическом расплаве при мгновенной декомпрессии, учитывающей пространственную неоднородность коэффициентов диффузии и бародиффузии, имеющих одинаковую зависимость от вязкости (условие постоянства бародиффузионного отношения).

Надо отметить, что в постановке, учитывающей неоднородность коэффициентов диффузии и бародиффузии, получение полуаналитического решения существенно затруднено. Причина заключается в том, что данные коэффициенты зависят от вязкости, которая, в свою очередь, определяется локальной концентрацией растворённого газа. В результате возникает нелинейная обратная связь: распределение concentra-

ции влияет на транспортные коэффициенты, входящие в уравнение переноса. Поэтому в общем случае решение такой задачи может быть получено только численно. Однако при моделировании дегазации магмы в процессе извержения вулкана подобные численные расчёты оказываются неприемлемо ресурсоёмкими, что ограничивает их практическое применение. Это делает необходимым поиск альтернативных приближённых полуаналитических подходов. Один из таких подходов — метод последовательных приближений. Суть его заключается в следующем. В нулевом приближении концентрационное поле находится из решения с постоянными транспортными коэффициентами (используя найденное ранее квазистационарное решение). Затем по полученному распределению концентрации вычисляются зависимости вязкости и данных коэффициентов от радиальной координаты. Подставляя эти зависимости в уравнение переноса и применяя описанный выше квазистационарный подход, получаем интегро-дифференциальное уравнение — уточнённое полуаналитическое решение задачи.

Проведённые на примере риолитового магматического расплава расчёты показали, что пренебрежение неоднородностью коэффициентов диффузии и бародиффузии приводит к существенному завышению скорости роста пузырька, тогда как реальное снижение их значений в диффузионном пограничном слое (которое игнорируется в упрощённой модели) замедляет его рост. В то же время предложенный итерационный полуаналитический метод демонстрирует хорошее согласие с прямым численным расчётом, что однозначно подтверждает его применимость и эффективность.

Таким образом, в настоящей работе впервые получено полуаналитическое итерационное решение задачи роста газового пузырька в магматическом расплаве, учитывающее пространственную неоднородность коэффициентов диффузии и бародиффузии. Предложенный подход хорошо согласуется с прямым численным расчётом и при этом вычислительно эффективен, что позволяет использовать его для описания процесса дегазации магмы в целом, включая динамику ансамблей пузырьков в условиях реального извержения.

Список литературы:

1. Chernov A.A., Davydov M.N., Ermanyuk E.V. Dynamics of the growth of a gas bubble in a magmatic melt during its decompression: the effect of barodiffusion // Journal of Fluid Mechanics. 2025. V.1018. A6:1-18. DOI: 10.1017/jfm.2025.10503

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

НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫЕ ГАЗОЖИДКОСТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТА

Минаков А.В., Жигарев В.А., Неверов А.Л., Гузей Д.В., Пряжников М.И., Ваганов Р.А.

ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет,
пр. Свободный 79, Красноярск, 660041, Россия

Современный этап разработки нефтяных месторождений РФ характеризуется постепенным переходом от традиционных методов заводнения к технологиям третичного, или увеличенного, воздействия на продуктивные пласты. Среди этих технологий особое внимание уделяется химическим методам, в частности заводнению с применением специальных реагентов. Сущность такого воздействия заключается в реализации нескольких механизмов одновременно, а именно в снижении межфазного натяжения на границе контакта нефти с закачиваемой водой, в контроле смачиваемости породы и в оптимизации реологических свойств вытесняющего агента, что в совокупности позволяет увеличить охват пласта.

Несмотря на широкое распространение, традиционные реагенты, такие как растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ) и полимеров, обладают серьёзными технологическими ограничениями: значительная адсорбция ПАВ на поверхности породы, ведущая к быстрой утрате активного компонента, а также термо- и механодеградация полимерных цепей, происходящие непосредственно в пластовых условиях, нестабильность свойств этих реагентов в присутствии высокоминерализованной пластовой воды, и высокая стоимость синтетических ПАВ [1]. Все перечисленные факторы в итоге снижают конечную эффективность процесса заводнения и существенно ограничивают возможности промышленного применения традиционных химических агентов.

Альтернативой могут выступать газожидкостные системы, или стабилизированные пены, которые относятся к числу перспективных составов для повышения нефтеотдачи пластов. Их применение оказывается особенно целесообразным на месторождениях с выраженной неоднородностью коллектора после завершения этапа обычного заводнения. Основное технологическое преимущество пенных систем — способность селективно блокировать высокопроницаемые промытые каналы, перераспределяя потоки и вовлекая в разработку низкопроницаемые зоны [2]. Высокая кажущаяся вязкость и неньютоновские свойства пены выравнивают фронт вытеснения: проникая в высокопроницаемые пропластки, пена создаёт дополнительное сопротивление, направляя воду или газ в низкопроницаемые области, что повышает макро- и микроскопическую эффективность вытеснения [3]. В последнее время появилось много работ посвящённых оптимизации газожидкостных систем наночастицами [4-5].

Цель настоящей работы состоит в анализе потенциала применения газожидкостных систем, модифицированных наночастицами, для интенсификации извлечения нефти. Достижение указанной цели потребовало решения нескольких научно-практических задач,

включающих синтез и оптимизацию составов таких систем с заданными реологическими и коллоидными свойствами, комплексное определение их физико-химических характеристик (поверхностного натяжения, устойчивости пены и реологии), а также оценку эффективности наномодифицированных пен в качестве агентов повышения нефтеотдачи методом фильтрационных экспериментов на моделях керна.

В ходе фильтрационных испытаний были установлены зависимости коэффициента вытеснения нефти от концентрации и среднего размера вводимых наночастиц. Подбор оптимального диапазона этих параметров обеспечивает максимальную стабильность пены в пористой среде и наибольший прирост вытесняющей способности. Так, при вытеснении нефти из керна коэффициент вытеснения составил около 40%, а при тех же условиях базовой пеной на 15 % больше. Дополнительное введение наночастиц в состав газожидкостной системы приводило к дальнейшему повышению эффективности за счёт стабилизации пены, снижения её деструкции при фильтрации и более равномерного блокирования поровых каналов. Таким образом, разработанные наномодифицированные газожидкостные композиции демонстрируют значительный потенциал в задачах нефтевытеснения по сравнению как с традиционным заводнением, так и с немодифицированными пенами. Полученные результаты открывают перспективы для направленного конструирования нано-модифицированных пен применительно к конкретным геолого-физическим условиям пласта.

Список литературы:

1. Austad T., Taugbøl K. Adsorption of surfactants on reservoir rock minerals // *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 1995. V. 98, N 1-2. P. 85–96.
2. Foams in enhanced oil recovery. In: *Foams: Theory, Measurements, and Applications* / W.R. Rossen; ed. R.K. Prud'homme, S.A. Khan. New York: Marcel Dekker, 1996. 413–464 с.
3. Fundamentals of foam transport in porous media. In: *Foams: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry* / A.R. Kovscek, C.J. Radke; ed. L.L. Schramm. Washington: ACS, 1994. 115–163 с.
4. Rostami A., Kalantariasl A., Mohammadi A.H. Nanoparticle-stabilized foams for enhanced oil recovery: A critical review of mechanisms, stability, and field applications // *J. Mol. Liq.* 2021. V. 334, P. 116120.
5. Zhao Y., Zhang Y. Synergistic effects of surfactants and silica nanoparticles on foam stability and enhanced oil recovery in heterogeneous reservoirs // *J. Pet. Sci. Eng.* 2020. V. 195. P. 107895.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского
научного фонда № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ

Зорькина А.И., Роньшин Ф.В.

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

Кипение – широко распространенный процесс, встречающийся как во многих областях промышленности, так и в повседневной жизни. Поскольку при кипении достигаются высокие коэффициенты теплопередачи, процесс активно применяется для охлаждения микроэлектроники, для которой характерно интенсивное локальное тепловыделение. Вследствие своей высокой прикладной значимости, а также сложности явление вызывает особый интерес у исследователей. Одновременно с этим некоторые фундаментальные вопросы все еще остаются открытыми. На процесс кипения оказывает влияние множество факторов: характеристики тепловыделяющей поверхности (смачиваемость и шероховатость), теплофизические свойства жидкости, естественная конвекция, экспериментальные параметры (давление в системе, температура жидкости, тепловые потоки, наличие внешних сил) и т.д. При этом многие эффекты, например, связанные с термокапиллярной конвекцией или с микроконвекцией, вызванной ростом соседнего пузыря, подавляются силой Архимеда. Для детального изучения данных эффектов можно исключить влияние силы Архимеда и естественной конвекции, исследуя кипение в условиях невесомости. Такие эксперименты также необходимы для расширения существующих корреляций на условия невесомости, что важно при разработке и дальнейшем использовании двухфазных систем охлаждения на борту космических аппаратов. Более глубокого понимания механизмов теплопередачи при кипении можно достичь, исследуя процесс в его самой упрощенной форме – рост одиночного парового пузыря в условиях невесомости (тем самым увеличив пространственное и временное разрешение измерений) и строгого контроля параметров.

В настоящей работе проведена обработка и анализ экспериментальных данных, полученных в ходе масштабного эксперимента по кипению на борту Международной космической станции [1]. В рамках эксперимента исследуется рост одиночного парового пузыря, механизмы теплопередачи, влияние экспериментальных параметров и внешних сил, включая сдвиговый поток и электрическое поле.

Экспериментальная установка – камера, заполненная рабочей жидкостью FC-72, предварительно дегазированной. Камера оснащена датчиками давления и температуры, что позволяет строго контролировать и задавать начальные параметры системы (давление и температуру) перед каждым экспериментальным прогоном. Паровой пузырь инициализируется на нагревателе через определенное время после его включения (время ожидания t_{wait}) при помощи лазерного импульса длительностью 20 мс в специальном месте – неглубокой каверне. Нагревателем служит тонкий

слой хрома (800 нм), нанесенный на подложку из фторида бария, прозрачную в ИК-диапазоне. Сбоку и снизу расположены высокоскоростные черно-белая и инфракрасная камеры, обеспечивающие синхронную регистрацию роста пузыря и распределение температуры на нагревателе.

Обработка черно-белых изображений пузыря выполнена при помощи архитектуры нейронной сети U-Net. Обученная модель позволила с высокой точностью определить широкий спектр геометрических параметров пузыря: диаметр, скорость роста, объем, контактный угол. Для исследования механизмов теплопередачи в программном обеспечении Matlab реализована численная модель для определения тепловых потоков с поверхности нагревателя. Продемонстрировано, что именно испарение с области трехфазной контактной линии вносит преобладающий вклад в рост пузыря. Детально исследована динамика роста парового пузыря в зависимости от экспериментальных параметров: давления p , температуры недогрева T_{sub} (рис. 1), плотности теплового потока q_{heat} и времени предварительного нагрева жидкости t_{wait} . А также проведено сравнение с корреляцией Ягова и Лабунцова для роста парового пузыря. Обнаружено значительное расхождение экспериментальной и теоретической зависимостей при высоких недогревах жидкости. Что подчеркивает необходимость комплексного исследования процесса в широком диапазоне варьируемых параметров. Полученные результаты позволят уточнить механизмы тепломассопереноса при кипении и усовершенствовать существующие корреляции, сделав их более универсальными.

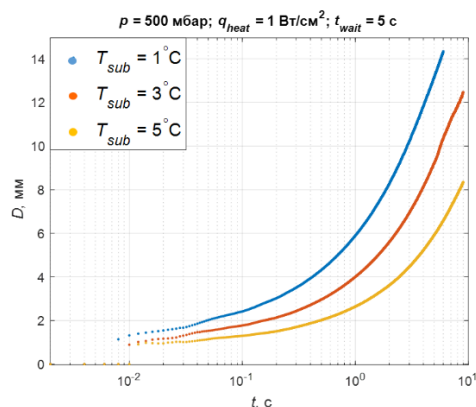


Рис. 1. Временная зависимость диаметра пузыря при разных температурах недогрева жидкости T_{sub}

Список литературы:

1. F. Ronshin, A. Rednikov, A. Zorkina, J. Lambert, I. Graur, O. Kabov, P. Colinet, and L. Tadrist. Bubble growth on a single artificial nucleation site near saturation conditions in microgravity //Physics of Fluids. – 2025. – Т. 37. – №. 8.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАССЛОЕНИЯ ЭМУЛЬСИИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Ковалева Л.А., Мусин А.А., Валиуллина В.И., Юлмухаметова Р.Р.

Уфимский университет науки и технологий,
ул. Заки Валиди 32, Уфа, 450076, Россия

Подготовка и транспортировка высоковязкой нефти осложнены в процессе ее добычи образованием устойчивых эмульсий типа «вода в масле». Традиционные методы разделения (гравитационное отстаивание, термическая и химическая обработка) часто недостаточно эффективны, особенно для мелкодисперсных эмульсий. Перспективным направлением является использование электромагнитного поля, однако его эффективность в динамических условиях мало изучена [1].

Разработана экспериментальная установка для исследования динамики движения эмульсии типа «вода в масле» в потоке. В ходе экспериментов эмульсия прокачивалась через специально разработанную ячейку (рис. 1) с помощью двух шприцевых насосов.

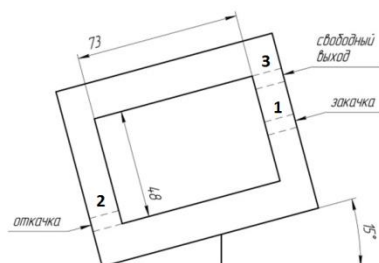


Рис. 1. Схема экспериментальной ячейки

Особенность ячейки состоит в том, что она имеет три технических отверстия: 1 – для закачки жидкости (Q1), 2 – для откачки жидкости (Q2); 3 – для слива жидкости (Q3). Для проведения экспериментов с воздействием электромагнитного поля на фронтальной и тыльной стенках ячейки были установлены прозрачные ИТО стекла. В первой вариации ячейки использовались плоские электроды, во второй – электроды пилообразной формы [2].

При ВЧ-воздействии процесс коалесценции капель проходит более интенсивно. Кроме того, были рассчитаны средние радиусы капель до и после электромагнитного воздействия. Радиус капель рассматриваемой эмульсии составил $r_0 = 12,7$ мкм, после НЧ-воздействия – $r_{НЧ} = 327,2$ мкм, а после ВЧ-воздействия – $r_{ВЧ} = 409,3$ мкм. Это доказывает высокую эффективность воздействия ВЧ-полем на эмульсию типа «вода в масле».

Математическая модель нестационарного течения дисперсной системы в прямоугольной ячейке включает в себя уравнение неразрывности и систему уравнений движений для дисперсной системы, уравнение сохранения массы в виде конвективно-диффузионного уравнения переноса для объемной концентрации диспергированной фазы [3].

На рис. 2 приведено распределение концентрации капель эмульсии в ячейке при разных соотношениях расходов на выходе. Видно, что в случае, когда расход через Q2 ниже, концентрация капель у выхода Q2

больше, а в случае, когда расход Q2 выше, концентрация капель у выхода Q2 меньше.

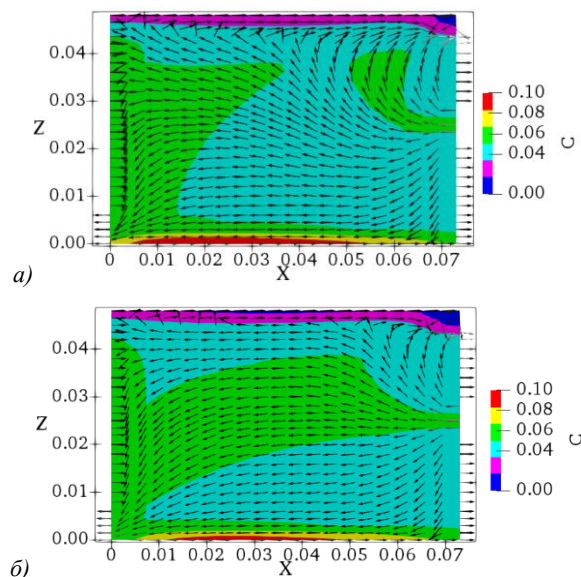


Рис. 2. Распределение концентрации капель эмульсии в ячейке при разных соотношениях расходов на выходе: а) $Q3:Q2 = 4:1$; б) $Q3:Q2 = 3:5$;

Результаты исследований показали, что вынужденная конвекция в сочетании с электромагнитным воздействием позволяет эффективно управлять расслоением дисперсных систем в динамических условиях. Оптимальная конфигурация ячейки обеспечивает вынос коалесцировавших капель и снижение остаточной водной фазы. Особенно эффективно высокочастотное электромагнитное поле, которое разрушает стабилизирующие оболочки капель и ускоряет их коалесценцию. Использование зигзагообразных электродов позволяет локализовать зоны максимальной напряжённости поля, что существенно повышает эффективность разделения фаз. Предложенная конфигурация может быть использована для разработки компактных устройств электродегидрации при трубопроводной транспортировке.

Список литературы:

1. Valiullina V. et al. Experimental and numerical study of the water-in-oil emulsion thermal motion in rectangular cavity with a heated bottom // International Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics". Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 117-125.
2. Mullanov A.I., Musin A.A., Valiullina V.I., Kovaleva L.A. The features of the microemulsion structure changes under the nonhomogeneous alternating electric field impact. Lett. Mater., 2024. Vol. 14, № 1. P. 57-61.
3. Юлмухаметова Р. Р., Мусин А. А., Валиуллина В. И., Ковалева Л. А. Математическое моделирование течения суспензии в системе пересекающихся трещин // Сиб. журн. индустр. матем. 2023. Т. 26, № 1. С. 201–211.

Работа поддержана РФФ
(грант № 19-11-00298).

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АНОМАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВЫСОКОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ

Кравченко М.Н.^{1,2}, Аминев Д.А.¹

¹ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,
пр. Ленинский 65 к1, Москва, 119991, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, Москва, 119991, Россия

Обострившая борьба на мировых рынках за тяжелые нефти стимулирует российские компании к возвращению в активную фазу проектов по добыче высоковязких (тяжелых) нефтей из углеводородных пластов, относящихся к категории трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ). Промысловый опыт свидетельствует о неэффективности процессов нефтеизвлечения с помощью классических технологий добычи.

Наиболее перспективными для ТРИЗ считаются подходы, сочетающие высокотемпературное воздействие (нагнетание перегретого пара и т.п.) с применением химических реагентов (полимеров, растворителей, кислот, щелочей). Повышением температуры, например, свыше 150 градусов вязкость пластовой тяжелой нефти можно снизить на порядок с выходом фактически на плато постоянных значений по вязкости. Дальнейшее повышение температуры в зоне дренирования (зоне проникания активного состава) повышает коэффициент подвижности нефти, за счет чего и ожидается существенное повышение степени нефтеизвлечения.

Однако так происходит лишь для определенного типа месторождений (терригенных), минеральная матрица которых не имеет в своем составе ощутимого набора кальциевых включений (кальцита, доломита), характерных для других (карбонатных) месторождений. Для карбонатных залежей технология закачки высокотемпературных теплоносителей (до 350 град. С) оказывается неприменима за счет резкого роста фильтрационного сопротивления при достижении температуры выше 150 градусов вплоть до о полного "запирания" потока. Как показали исследования авторов и физические эксперименты на кернах и микрофлюидных чипах для карбонатов наблюдается кольматация порового пространства за счет двух явлений - изменения структуры нефти с выделением тяжелых фракций и роста техногенных нано-кристаллов за счет высокотемпературных преобразований кальцитов, содержащихся в минеральной матрице породы. В этом случае "раскольматировать" пористую матрицу можно путем дополнительной закачки активных реагентов, химически растворяющих новообразования [1].

Другой подход для разработки ТРИЗ базируется на закачке высоковязких вытеснителей на основе полимерных составов, имеющих повышенную вязкость, и включающих поверхностно-активные вещества (ПАВ), изменяющие коэффициент смачиваемости. Однако, используемые с этой целью композиционные смеси, как правило, имеют высокую степень деструкции, как тепловой, так и механической. Добавка хелатных комплексов и наночастиц металлов до состояния

образования высоковязкого армированного гидрофобного геля позволяет существенно улучшить качество вытеснения нефти, в том числе за счет изолирования водопроводящих каналов. Опытные-промышленные испытания гелеобразующих систем, с одной стороны, показали их явные преимущества, выражающиеся в выравнивании профиля фронта вытеснения, с другой стороны на практике были зафиксированы "аномальные" эффекты периодического повышения/понижения водо- и нефтенасыщенности [2].

Создание обобщенной модели фильтрации псевдопластического флюида [3] и имитационные расчеты позволили объяснить установленный "феномен" свойством тиксотропии (гистерезиса в процессе нагрузки/разгрузки) для псевдопластической жидкости (геля). На Рис.1 графики для нефти и гидрогеля (слева), отражают не только изменение вязкости с ростом градиента давления, что объясняется разрушением структуры вязкого флюида с ростом нагрузки, но и показывают, что обратное восстановление реологических свойств происходит с учетом гистерезиса. В этом случае применение закона фильтрации позволяет объяснить колебательный характер притока нефти и воды, наблюдаемый на практике. Подбор концентрации компонент гелеобразующего состава изменяет характер колебаний (амплитуду и частоту) и дает возможность увеличить коэффициент вытеснения, что и было установлено путем численного моделирования процесса закачки геля на модели реального керна.

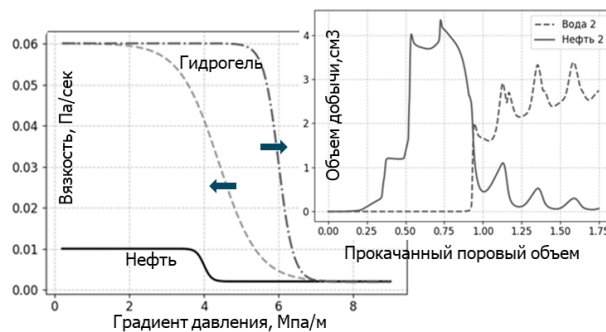


Рис.1. Проявление гистерезиса вязкого трения

Список литературы:

1. Лесина Н.В., Усачев Г.А., Кравченко М.Н. Повышение эффективности разработки месторождений высоковязкой нефти // Геология и недропользование, 2023, № 2(12), С.69- 75.
2. Фахретдинов Р.Н., Фаткуллин А.А., Якименко Г.Х. и др. Применение псевдопластичной гидрофобной полимерной системы SPA-Well для повышения нефтеотдачи // Нефтяное хозяйство, 2021, 11, С.120-123.
3. Dieva N., Aminev D., Kravchenko M., Smirnov N. Overview of the Application of Physically Informed Neural Networks to the Problems of Nonlinear Fluid Flow in Porous Media // Computation. 2024. Vol.12, N4. P.69.-DOI 10.3390/computation12040069.

ИЗУЧЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ

Волков С.М., Лобанов П.Д., Гуляев Н.А., Качурин С.К., Панков А., Кабардин И.К., Зубанов К.С.

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

Задачи проектирования и совершенствования оборудования и технологий для производства глинозёма чрезвычайно сложны. Параметры течения неньютоновских сред — пульп и концентрированных растворов — сложно предсказать с помощью предварительных гидродинамических расчётов. Известные обобщённые уравнения дают неприемлемо высокие погрешности при решении конкретных практических задач методами вычислительной гидродинамики.

Разработка методов экспериментальной диагностики течений многофазных неньютоновских жидкостей, в том числе в аппаратах колонного типа, позволяет оптимизировать конструкции и существенно повысить эффективность и безопасность установок горно-обогащительной промышленности. Режимы течения многофазных неньютоновских жидкостей и связанная с ними проблема диагностики играют значительную роль в изучении процессов переноса в полидисперсной пульпе. Улучшение массопереноса обычно достигается за счёт поперечного перемешивания, связанного с турбулентными потерями.

Методы измерения локальных характеристик высококонцентрированных двухфазных дисперсных течений можно в первую очередь разделить на контактные (возмущающие поток) и бесконтактные. Среди измерительных средств наиболее предпочтительны бесконтактные методы, так как одним из их важнейших преимуществ является отсутствие возмущающего воздействия на поток [1]. К неинвазивным методам относятся: фотографирование (в том числе скоростная съёмка), ЛДА (LDA), PIV, PTV (стробоскопическая визуализация), тепловые и электродиффузионные датчики (заподлицо со стенкой потока), датчики статического и пульсационного давления, акустические и радиочастотные датчики, томография на основе рентгеновских и гамма-лучей, магнитно-резонансная томография (МРТ), трассирующие частицы и др.

Отличительной особенностью физического моделирования течений с полидисперсной пульпой является (в большинстве случаев) ограниченная или невозможная применение классических оптических методов, таких как ЛДА, PDA, PTV, PIV, LIF и других, поскольку такие среды оптически непрозрачны. Лазерная доплеровская анемометрия широко используется для измерения локальных характеристик в различных двухфазных потоках при низких концентрациях дисперсной фазы. Методы, основанные на принципах лазерной доплеровской анемометрии, позволяют одновременно измерять скорость, концентрацию и размер частиц, что даёт преимущество перед другими методами. Информация о скорости получается путём измерения доплеровского сдвига частоты света, рассеянного частицами, а сведения о размере частиц могут быть получены путём измерения амплитуды сигнала

или разности фаз между частотными сигналами с двух (или трёх) фотодетекторов, установленных под разными углами.

Цель работы - получение информации о локальных и интегральных гидродинамических характеристиках течения полидисперсной пульпы в моделях аппаратов колонного типа.

В данном исследовании был разработан метод оптической диагностики гидродинамики полидисперсной пульпы с использованием иммерсионной жидкости. Данный метод позволяет получать информацию о локальных и интегральных гидродинамических характеристиках многофазного течения пульпы в модели. Он основан на методе скоростной визуализации частиц и помещении оптически прозрачной модели пульпы в иммерсионную жидкость с показателем преломления, эквивалентным показателю преломления материала модели. При помещении прозрачного объекта в жидкость с показателем преломления, равным показателю преломления материала объекта, объект становится невидимым. Границы, определяющие гидродинамику и теплообмен, сохраняются, при этом исчезают преломление и рассеяние света на границах объекта. Устраняются препятствия, которые ранее мешали оптическим методам получать достоверную информацию о процессах, ограниченных границами крупнодисперсной фазы.

С помощью метода PIV проведено исследование гидродинамики течения в модели пульпы из прозрачных шаров и иммерсионной жидкости. Было показано, что гидродинамические характеристики таких течений, как локальные, так и интегральные, существенно зависят от геометрической структуры пористой среды. Процессы в данном случае протекают со значительным подавлением явлений отрыва, что в первую очередь связано с уменьшением объёма порочной ячейки между шарами.

Были измерены распределения компонент вектора скорости фильтрационного потока в различных плоскостях и профили их среднеквадратичных пульсаций. Было показано, что градиент скорости максимален вблизи стенок шаров. Увеличение числа Рейнольдса приводит к сглаживанию профиля скорости в данном сечении ячейки.

Список литературы:

1. Wiederseiner, S., Andreini, N., Epely-Chauvin, G., Ancey, C., "Refractive-index and density matching in concentrated particle suspensions: a review", *Experiments in Fluids*, vol. 50, no. 5, pp. 1183-1206, (2011).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00627, <https://rscf.ru/project/25-19-00627>.

ПРИМЕНЕНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ СПЛАВАХ И ИХ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Маликов А.Г.¹, Витошкин И.Е.¹, Шмаков А.Н.²

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

² Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов", пр. Морской, 2, Новосибирск, 630090, Россия

В настоящее время в авиастроении идет внедрение высокопрочных алюминий-литиевых сплавов. Лазерные сварные соединения этих сплавов имеют низкие механические свойства. Снижение прочности сварных соединений данных сплавов связано с изменением структурно-фазового состава в результате лазерного воздействия. Известно, что посттермообработка лазерных сварных соединений в виде процесса закалки и искусственного старения позволяет восстанавливать структурно-фазовый состав сварного шва и повышать механические характеристики [1]. Однако на сегодняшний день остро стоит вопрос выбора оптимальных режимов термообработки с точки зрения выбора температуры. Это нетривиальная задача. Дело в том, что термообработку необходимо проводить для всего образца, включающего как разупрочнённый шов, так и упрочнённую часть сплава. Таким образом, режимы термообработки должны выполнять две взаимно противоречивые задачи. С одной стороны, обеспечить изменение фазового состава сплава по замкнутому циклу, т. е. вернуть его в процессе термообработки в исходное состояние, а с другой стороны, в шве необходимо создать упрочняющие фазы, доведя его прочность до прочности исходного сплава. Именно это обстоятельство не позволяло априори использовать известные схемы термообработки, которые применяются при промышленном производстве сплавов системы Al-Li. Режим термообработки включает два процесса: закалку и искусственное старение. Закалка — это нагрев сплава до максимально высокой температуры, выдержка и последующее быстрое охлаждение с целью получения пересыщенного твёрдого раствора, т. е. получение в сплаве предельно неравновесного фазового состояния (пересыщенный твёрдый раствор с максимальным содержанием легирующих элементов). Такое состояние даёт возможность упрочнения при последующем искусственном старении. Искусственное старение — процесс, заключающийся в нагреве закалённых сплавов до температур 100–200 °С и выдержке при этих температурах до десятков часов с целью распада пересыщенного твёрдого раствора, структурных изменений и формирования упрочняющих фаз в твёрдом растворе. Именно на стадии закалки необходимо четко фиксировать температуру, при которой как для сплава, так и для сварного шва фиксируется неравновесное фазовое состояние. При этом в алюминиевых сплавах, используемых в промышленности, наблюдается лишь один вид фазовых превращений: при нагреве интерметаллидные фазы растворяются в алюминии, а при охлаждении вновь выделяются из твёрдого раствора. Таким образом, закалка возможна только для алюминиевых спла-

вов, содержащих компоненты, растворимость которых в твёрдом алюминии возрастает с температурой (Cu, Mg, Mn, Si, Zn, Li). Температура гомогенизации должна быть выше температуры полного растворения легирующих компонентов в алюминии, но ниже температуры равновесного солидуса. Кроме того, при выборе температуры гомогенизации следует учитывать наличие неравновесной эвтектики, температура плавления которой равна Тэв. Если слиток быстро нагреть до температуры выше Тэв, то эвтектика расплавится, образовавшаяся жидкость через некоторое время снова закристаллизуется. Тем не менее нагрев при гомогенизации, да и при любом виде термообработки, до появления жидкой фазы обычно не допускается, поскольку это сопровождается межзерненным окислением и образованием пористости, что приводит к снижению прочности и особенно пластичности сплавов. Чтобы получить полное представление о чувствительности стареющих сплавов к температуре нагрева, необходимо проанализировать кинетику и природу выделений, вызванные термической обработкой. Возможности применения анализа *in situ* ранее были ограничены, поэтому большая часть экспериментальных работ основана на экспериментах *ex situ*. В основном применяют методы, позволяющие определить изменение свойств в зависимости от фазовых переходов. Фазовые превращения редко удается обнаружить напрямую, хотя в определенной степени это возможно с использованием просвечивающей электронной микроскопии в режиме *in situ*, что требует очень больших усилий. Одним из методов *in situ* измерения фазовых превращений в результате нагрева является калориметрия и, в частности, дифференциальная сканирующая калориметрия. Однако данный метод не позволяет точно определить какая фаза образовалась либо растворилась в определенном диапазоне температур. В последнее время с развитием источников синхротронного излучения развивается методика *in situ* с помощью рентгеновской дифракции [2]. В работе проведены уникальные высокотемпературные исследования структурно-фазовых превращений с помощью синхротронного излучения в режиме *in situ* на примере алюминий-литиевых сплавов и его сварных швов. Впервые было изучено поведение фаз при нагреве и охлаждении. Определены температуры распада и формирования фаз.

Список литературы:

1. Маликов А. Г. Современные тенденции лазерной сварки и аддитивных технологий // ПМТФ. 2023Т.64, № 1. С.36–59
2. Zhang, L.E. *In situ* structural characterization of ageing kinetics in aluminum alloy 2024 across angstrom-to-micrometer length scales // Acta Mater. 2016. Vol.111 P. 385–398.

Работа поддержана РФФ
(грант № 23–79–00037).

КОНВЕКТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В РАМКАХ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ КОЗЕНИ-КАРМАНА

Марышев Б.С., Клименко Л.С.

Институт Механики Сплошных Сред УрО РАН,
ул. Ак. Королева 1, Пермь, 614990, Россия

Изучается конвективная устойчивость горизонтального просачивания смеси через слой пористой среды при наличии иммобилизации и закупорки. Фильтрационный поток смеси, состоящей из несущей жидкости и примеси, создается постоянным градиентом давления. Предполагается, что некоторая часть примеси может оседать на стенках пор. Моделирование транспорта примеси проведено в рамках МИМ (mobile/immobile media) подхода. [1]. Процесс иммобилизации описывается с помощью нелинейной модели с насыщением немобильной компоненты [2]. Фильтрационное течение описано в рамках приближения Дарси-Буссинеска [3]. При иммобилизации примесь занимает часть порового пространства, т.е. снижается пористость среды и ее проницаемость. Как было показано в работе [4], для многих материалов в качестве зависимости проницаемости среды от пористости можно использовать обобщенное соотношение Козени-Кармана. Основной задачей исследования является изучение условий возникновения конвекции в зависимости от параметров обобщенного соотношения.

На основе законов сохранения массы для подвижной получены уравнения, описывающие рассмотренную задачу:

$$(1 - \zeta Q) \partial_t C + \zeta \left(\frac{1}{C_0} - C \right) \partial_t Q = -U \cdot \nabla C + (1 - \zeta Q) \Delta C - \zeta \nabla Q \cdot \nabla C,$$

$$U = \frac{\kappa}{\kappa_0} (-\nabla P + R_p C), \quad \text{div} U = 0,$$

$$\partial_t Q = a(1 - Q)C - bQ, \quad \kappa(\phi) = \frac{\phi^{3+\sigma}}{(1 - \phi)^{2\eta}},$$

$$\phi = \phi_0 (1 - \zeta Q).$$

Задача допускает решение, соответствующее режиму стационарной горизонтальной фильтрации в следующем виде:

$$Q^0(y) = 1 - \exp \left\{ W \left[(\zeta - 1) e^{-\beta / \zeta} \right] + \beta \right\},$$

$$\beta = B_1 y + B_2, \quad U^0 = \kappa / \kappa_0 P e,$$

$$B_1 = \frac{(\zeta - 1)a}{\zeta b} - \ln \left(1 + \frac{a}{b} \right), \quad B_2 = \frac{(\zeta - 1)}{\zeta}.$$

$$C^0 = b / a \cdot Q^0 / (1 - Q^0), \quad P^0 = R_p \int C^0 dy + Gx.$$

Зависимость концентрации от координаты поперек слоя в основном состоянии приведена на рис. 1.

Получены условия возникновения двумерного конвективного течения в виде зависимостей критического числа Релея-Дарси от параметров модели. Показано, что по сравнению с классическим соотношением может наблюдаться как стабилизация горизонтальной

фильтрации, так и дестабилизация. А так же волна бегущая вверх по течению. Показано, что этот эффект нелинейный и зависит от пористости среды и степени закупорки.

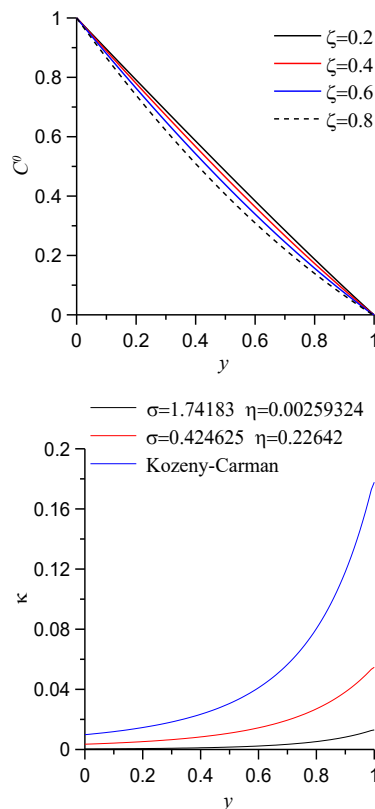


Рис. 1 – Распределение концентрации поперек слоя для различных значений коэффициента закупорки при $a = b = 5$ (сверху) и соответствующее распределение проницаемости при $\zeta = 0.8$ (снизу).

Список литературы:

1. Deans H. A. A mathematical model for dispersion in the direction of flow in porous media // SPE Journal. – 1963. Vol. 3. P. 49-52.
2. Selim H. M. Prediction of contaminant retention and transport in soils using kinetic multireaction models // Environ. Health Perspect. – 1989. Vol. 83. P. 69-75.
3. Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. Springer – 2017, 988 p.
4. Henderson N., Brëttes J. C., Sacco W. F. A three-parameter Kozeny–Carman generalized equation for fractal porous media // Chem. Eng. Sci. – 2010. Vol. 65. P. 4432-4442 Deans H. A. A mathematical model for dispersion in the direction of flow in porous media // SPE Journal. 1963. V1. 3. N. 1. P. 49-52

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта "Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях" при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КАПИЛЛЯРНЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ СЕТЧАТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Орлова Е.Е., Минин С.В.

Научно-технологический университет «Сириус»,
Олимпийский просп., 1, Сириус, 354340, Россия

Пористые сетчатые материалы (ПСМ) широко применяются в фильтрационных, сепарационных и теплообменных системах, а также в узлах ракетно-космической и энергетической техники, где их эксплуатационная надежность определяется балансом гидравлического сопротивления и капиллярной удерживающей способности. Традиционное определение указанных характеристик опирается на экспериментальные исследования и эмпирические корреляции, разработанные для ограниченного числа типов сеток и узких диапазонов режимов течения, что существенно затрудняет прогнозирование работы устройств в новых условиях. В связи с этим все более широкое применение находит математическое моделирование, позволяющее детально учитывать микроструктуру ПСМ, локальную гидродинамику и эволюцию межфазных границ, а также проводить параметрические исследования в широком диапазоне геометрических и режимных параметров без значительных временных и финансовых затрат. Использование вычислительных методов особенно критично при изучении двухфазных течений: экспериментальная визуализация и контроль фазового распределения в микропорах крайне затруднены, тогда как численный подход обеспечивает воспроизводимое получение полей течения и интегральных характеристик, создавая необходимую базу для выявления количественных зависимостей между однофазными и двухфазными свойствами ПСМ. Получение таких зависимостей на основе параметрических расчетов позволяет сократить объем экспериментальных исследований и ускорить проектирование устройств на основе ПСМ, что определяет практическую значимость данной работы.

Цель работы заключается в определении гидравлических характеристик ПСМ при однофазном и двухфазном обтекании, капиллярной удерживающей способности при двухфазном обтекании, а также в установлении количественных зависимостей между этими режимами. Задача решается в трехмерной постановке для ячеек периодичности (см. рис. 1) в диапазоне чисел Рейнольдса по Армору от 0,1 до 300, что охватывает вязкостный, переходный и инерционный режимы течения. Однофазные течения моделируются на основе уравнений Навье–Стокса в ламинарной и RANS-постановках, тогда как двухфазные процессы и определение капиллярной удерживающей способности выполняются методом объема жидкости (VoF) с учетом сил поверхностного натяжения и смачиваемости. Расчеты реализованы в отечественном программном комплексе «Логос». Для однофазного режима проведена верификация и валидация методики, которая показала относительное отклонение коэффициента гидравлического сопротивления от экспериментальных

данных [1] на уровне 6–17% в стационарных режимах и до 35% на переходных режимах. На основе этой валидированной базы выполнена серия расчетов двухфазного обтекания для тех же геометрических конфигураций и режимных параметров с целью выявления зависимостей между характеристиками пористых сетчатых материалов в однофазном и двухфазном режимах течения.

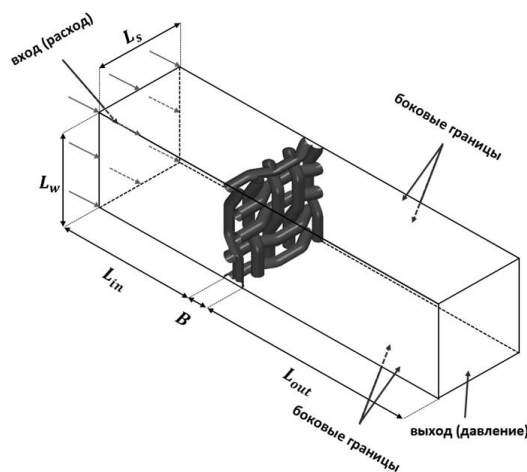


Рис. 1. Расчетная область.

В докладе будут продемонстрированы результаты параметрических расчетов: зависимости коэффициента гидравлического сопротивления и капиллярной удерживающей способности от числа Рейнольдса и пористости для двухфазного режима обтекания ПСМ. Найдены корреляции, позволяющие прогнозировать поведение двухфазной системы по результатам однофазных расчетов. Установлена количественная зависимость между коэффициентом гидравлического сопротивления при однофазном течении и гидравлическими характеристиками, полученными при двухфазном обтекании для тех же геометрических конфигураций ПСМ.

Список литературы:

1. Yoshida Y., Inoue Y., Shimosaka A., Shirakawa Y. and Hidaka J. Numerical Simulation of Flow Resistivity of Metal Woven Mesh. Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 48, No. 7, pp. 545–555, 2015.

Результаты получены при финансовой поддержке, реализуемой в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение №3-03 от 18.02.2025).

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КАВИТАЦИОННЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ В ГИДРОСИСТЕМАХ ПРИ НАЛИЧИИ ВЕНТИЛИРУЕМОЙ ГАЗОВОЙ КАВЕРНЫ

Очеретяный С.А., Прокофьев В.В., Топейцев Г.В.

Институт Механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
Мичуринский пр. 1, Москва, 119192, Россия

В струйных установках, использующих пульсирующие технологии, происходит заметный рост производительности и вместе с тем снижение удельной энергоемкости разрушения материалов и снижение потребления воды. В исследуемой в работе гидравлической схеме колебания (автоколебания) давления возникают естественно, без использования механических систем при постоянных давлении напора и массовом расходе поддуваемого в вентилируемую камеру газа. Принципиальным тут является наличие в системе кавитатора, за которым образуется вентилируемая камера и второго сопротивления (выходного сопла). Механизм обратной связи начинается работать, когда кормовая часть каверны достигает выходного сопла генератора

На рисунках показаны схемы экспериментальных осесимметричных установок в виде моделей двух вариантов генератора импульсных струй. Это компоновка с центральной камерой (рис.1) и компоновка с центральной струей (рис.2). В обоих случаях за кавитатором 1 в цилиндрической трубе 3 образуется камера 2, смесь воды и воздуха вытекает наружу через сужающееся сопло 4. Основное внимание в докладе уделено высокочастотному режиму, когда колебания давления в камере и в форкамере (находится перед рабочей частью с кавитатором 1) практически отсутствуют, но имеет место близкое к периодическому прерывистое истечение жидкости из сопла, сопровождающееся ударным воздействием струи на экран-мишень 5.

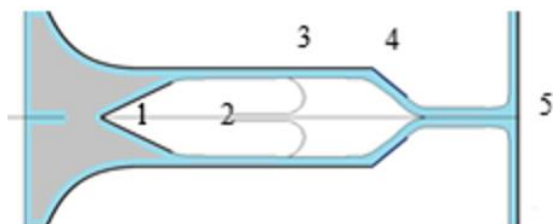


Рис. 1. Осесимметричная модель генератора импульсных струй, с центральной камерой

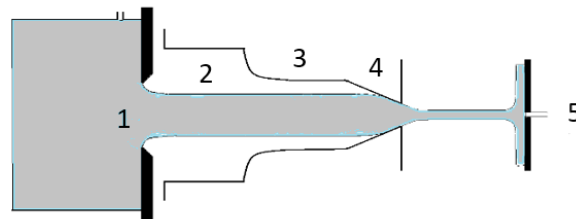


Рис. 2. Осесимметричная модель генератора импульсных струй, с центральной струей

Путем анализа соответствующих задач о стационарном плоском течении несжимаемой жидкости (решение было получено методами ТФКП с использованием квазидвоякопериодических тэта функций), показано, что область течений с неустойчивой по Релею-Тейлору границей каверны находится вблизи предельного решения (происходит замыкание каверны в точке возврата).

Отметим, что даже при давлении напора жидкости порядка одной атмосферы на границе каверны в области неустойчивости развиваются ускорения на два порядка, превосходящие ускорение свободного падения, что определяет весьма высокие скорости развития структур Релей-Тейлора. Оказалось, что появление в экспериментах высокочастотного режима совпадает с условиями возникновения режима замыкания каверны в плоских задачах. В предположении о периодическом характере развития структур Релей-Тейлора проведены оценки глубины проникновения структур в струю, которые показали, что эта величина имеет порядок или даже превосходит ширину истекающей из сопла струи.

Таким образом в работе показано, что в присутствии вентилируемой каверны, в случае, когда давление в камере больше, чем во внешнем пространстве, развивающиеся на неустойчивой границе струи периодические структуры Релей-Тейлора могут обеспечить прерывистый режим истечения струи.

ВЛИЯНИЕ МЕЖФАЗНЫХ ЯВЛЕНИЙ И ДИФфуЗИИ КОМПОНЕНТОВ МАСЛЯНОЙ ФАЗЫ НА ДИНАМИКУ ФОРМИРОВАНИЯ АЛЬГИНАТНЫХ МИКРОКАПСУЛ В МИКРОФЛЮИДНОМ ЧИПЕ

Пискунова А.Е.^{1,2}, Фахми А.¹, Ашихмин А.Е.², Пискунов М.В.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр. Ленина 30, Томск, 634050, Россия

² Сургутский государственный университет,
пр. Ленина 1, Сургут, 628412, Россия

Экспериментальное исследование посвящено процессу микроинкапсулирования биологически-активного вещества – водного экстракта тимьяна – с использованием капельной микрофлюидики. Особое внимание уделяется изучению влияния концентрации уксусной кислоты в масляной фазе (0,05–0,5 масс.%) на кинетику ионного сшивания альгината натрия, материала оболочки микрокапсул, а также влияния концентрации поверхностно-активного вещества (ПАВ) Span80 (0,1–1,5 об.%) на геометрические характеристики микрокапсул, пассивно формируемых в микроканальном чипе с фокусировкой потока.

В качестве альгинатной фазы использовался водный раствор альгината натрия (0,6 масс.%) с добавлением карбоната кальция CaCO_3 . Пектиновая фаза представляет пектин цитрусовый (1 масс.%), растворенный в водном экстракте тимьяна (концентрация тимьяна 2,5 мг/мл). Масляная фаза представляет растительное подсолнечное масло с добавлением уксусной кислоты (CH_3COOH) (0,05; 0,1; 0,3; 0,5 масс.%) или ПАВ сорбитан моноолеата Span 80 (0,1; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 об.%). Динамическое межфазное натяжение (ДМН) на интерфейсе 0,6 масс.% водного раствора альгината натрия с растворенным до насыщения CaCO_3 и масляной фазой с добавлением уксусной кислоты либо ПАВ измерено методом висячей капли.

Инкапсулирование осуществлялось с использованием микрофлюидного чипа, изготовленного на высокоточном 3Д принтере ProFluidics 285D (CADworks 3D), с двумя Т-образными перекрестиями для фокусировки потока. Микрофлюидная система для генерирования микрокапель включает высокоточный насос без пульсаций, приводимый в действие перепадом давлением, для управления потоками жидкостей и высокоскоростной микроскоп с системой подсветки для видеорегистрации процесса.

В исследовании установлено, что значения ДМН на границе раздела альгинатной и масляной фаз увеличиваются при росте концентрации уксусной кислоты (см. рис. 1). Это обусловлено пропорциональным снижением pH водного раствора альгината натрия при увеличении содержания диффундирующей в него кислоты [1,2]. Установлена зависимость между временем стабилизации значений межфазного натяжения (см. рис. 1), которые определяют время завершения ионного сшивания альгината в системе, и концентрацией кислоты в масле. В данном исследовании осуществляется подбор оптимальной концентрации уксусной кислоты, достаточной для сшивания альгинатной оболочки микрокапсул внутри микрофлюидного чипа и не оказывающей агрессивного химического воздействия (истирания) на гидрофобное

покрытие микроканалов. Выбор оптимальной концентрации (0,1 масс.%) связан со временем сшивки, которое критически влияет на качество оболочки из альгинатного гидрогеля.

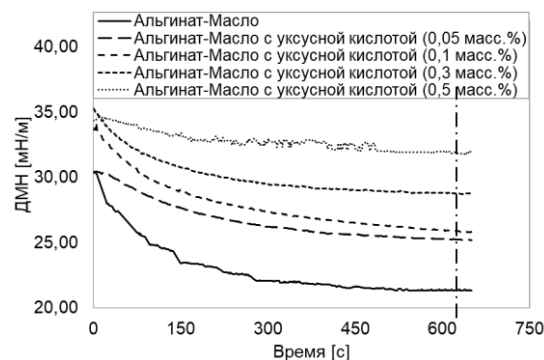


Рис. 1. Динамическое натяжение между альгинатной и масляной фазами с и без добавления уксусной кислоты.

Установлено влияние концентрации ПАВ на ДМН для регулирования течения многофазной жидкости и контролируемого формирования микрокапель. Выявлено, что критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) находится в диапазоне $0,1 \text{ об.}\% \leq \text{ККМ} \leq 0,5 \text{ об.}\%$. В этом диапазоне наблюдается снижение ДМН, которое обусловлено адсорбцией молекул Span 80 на межфазной границе [3]. Избыток ПАВ способствует формированию агрегатов из его молекул, что увеличивает диаметр формируемых микрокапель. При микрофлюидном формировании многокомпонентных микрокапель точная настройка концентрации Span 80 обеспечивает возможность влиять на межфазное натяжение и геометрические характеристики микрокапель. Однако, достижение ККМ определяет некоторый предел, после которого данные эффекты становятся неконтролируемыми.

Список литературы:

1. John J., Ray D., Aswal V. K., Deshpande A. P. and Varughese S. Dissipation and strain-stiffening behavior of pectin–Ca gels under LAOS // LNCs. 2015. V. 9351. P. 234–241.
2. Gao Z., Gao C., Jiang W., Xu L., Hu B., Yao X., Li Y. and Wu Y. In situ crosslinking sodium alginate on oil-water interface to stabilize the O/W emulsions // Food Hydrocoll. 2023. V. 135. P. 108233.
3. G. Simonsen, J. Kjolaas, P. R. Leinan and H. Schümann. Literature review on surface-active components in emulsions and foams: Theory and modelling efforts // Geoenergy Sci. Eng. 2023. V. 23. P. 212156.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Департамента образования и науки Ханты-Мансийского автономного округа — Югры (тема № 2023-578-05, «Разработка методов капельной микрогидродинамики для высокоточного производства лекарственных форм в ХМАО»).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЯНОЙ СТРУИ В БАССЕЙН РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

Сиваков Н.С., Якуш С.Е.

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

Взрывное взаимодействие воды с расплавом может происходить из-за быстрого вскипания летучего теплоносителя при контакте с высокотемпературным расплавленным материалом и приводить к возникновению ударных волн, формирующих импульсную нагрузку [1]. Актуальная проблема для быстрых реакторов с тяжелым металлическим теплоносителем связана с возможной аварией разрыва трубки парогенератора (SGTR), при которой пароводяная смесь под высоким давлением может проникнуть в объем расплава свинца, с давлением близким к атмосферному.

В работе [2] впервые применена высокоскоростная нейтронная радиография, позволившая визуализировать в реальном времени процесс инъекции недогретой водяной струи в бассейн с расплавом эвтектического сплава свинец-висмут. Получены количественные данные о глубине проникновения струи, геометрии и динамике пароводяной каверны, а также о распределениях объемной доли воды в каверне. Эти данные позволяют верифицировать многофазные CFD-модели взаимодействия струи с расплавом.

Трехмерное численное моделирование выполнялось для условий экспериментов [2]. Полная трехфазная система (расплав, вода, пар) с учетом фазового перехода на границе раздела вода-пар моделируется при помощи собственного расчетного модуля, реализованного в программном комплексе OpenFOAM на основе модели VOF.

В исследовании [3] установлено, что используемая модель качественно воспроизводит все основные стадии процесса, от проникновения струи и формирования пароводяной каверны до ее дальнейшего схлопывания и объемного кипения внутри. Количественные данные по глубине и ширине пароводяной каверны коррелируют с экспериментом.

В данной работе осуществлено развитие и дополнение результатов работы [3]. Так, применение метода адаптивного сгущения сетки (AMR) позволило лучше разрешить межфазную границу, благодаря чему удалось достичь улучшенного количественного согласия расчетных данных с экспериментом по глубине (см. рис. 1) и ширине (см. рис. 2) пароводяной каверны. Динамическое измельчение сетки в области границы раздела фаз позволило более точно воспроизводить гидродинамическую неустойчивость и процесс дробления струи и возникновения мелких капель расплава.

Дополнительные расчеты, выполненные без учета фазового перехода, продемонстрировали заметно более низкое совпадение с экспериментальными данными. Это подкрепляет, что учет парообразования в

задаче является критически важным, поскольку именно формирующаяся пароводяная смесь оказывает определяющее влияние на структуру течения, перераспределение плотности и интенсивность теплообмена в системе.

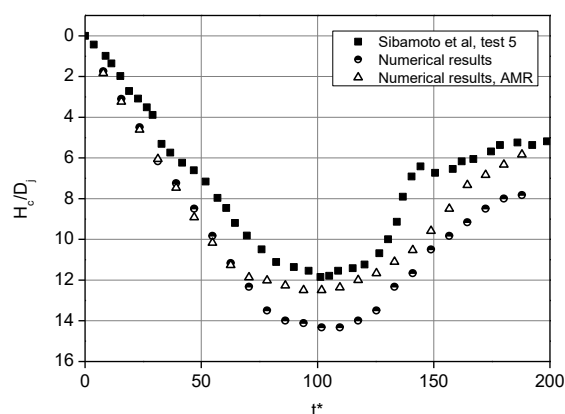


Рис. 1. Относительная глубина каверны.

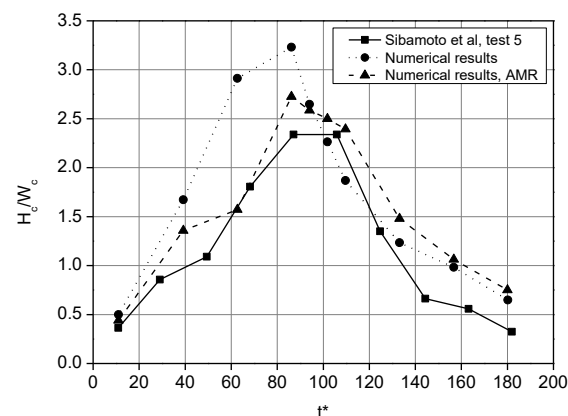


Рис. 2. Соотношение глубины и ширины каверны.

Список литературы:

1. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Теплофизика и гидродинамика паровых взрывов. М., ИПМех РАН, 2020, 276 с.
2. Sibamoto Y., Kukita Y., Nakamura H. Visualization and measurement of subcooled water jet injection into high temperature melt by using high-frame-rate neutron radiography // Nucl. Technol. 2002. V.139. P. 205–220.
3. Yakush S.E., Sivakov N.S., Melikhov O.I., Melikhov V. I. Three-phase VOF modeling of water jet – molten metal interaction // Nucl. Eng. Des. 2024. V. 418. Article 112893. P. 1–18.

Работа выполнена по теме
государственного задания ИПМех РАН
(номер гос. регистрации 124012500440-9).

ДРОБЛЕНИЕ КАПЕЛЬ ВУТ В ПОЛЕ СИЛ МАГНУСА

Плинокосов К.М., Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Замалтдинов Р.Р.

ФГАОУ ВО НИ Томский политехнический университет
пр. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия

Ввиду проблем внедрения повсеместного использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии, энергетика, основанная на ископаемых топливах, остается ключевым фактором устойчивого развития промышленности стран. ТЭЦ, применяющие уголь, нуждаются в существенных модернизациях технологий топливосжигания, так как использование такого источника энергии сопровождается значительными выбросами оксидов серы (SO_x) и азота (NO_x), а также диоксид углерода, считающийся основным парниковым газом [1]. Для нивелирования этого негативного эффекта возможным решением может служить технология сжигания угля в составе водоугольного топлива [2].

Однако технологии водоугольных топлив сопровождаются рядом серьезных проблем. Из-за значительной обводненности, капли стандартного размера (около 3–4 мм) горение затруднено — задержка воспламенения (t_{ign}) достигает значительных величин вплоть до 15 секунд [3]. Уменьшить этот показатель возможно путем тонкого измельчения водоугольных частиц до размеров порядка 0,1–0,5 мм. Следует отметить, создание конструкций форсунок или горелок основывается на многих факторах, присущих топливам — вязкость, обводненность, вид угля, поверхностное натяжение капель и др. В свою очередь от конструктивных особенностей зависят силы, участвующие в процессе распыления. Однако потенциальная возможность разрушения капель ВУТ с участием сил Магнуса не освещена.

Цель работы — обоснование по результатам исследования возможности разрушения капель водоугольного топлива силами Магнуса, с применением в качестве оценки числа Вебера для вращательного момента.

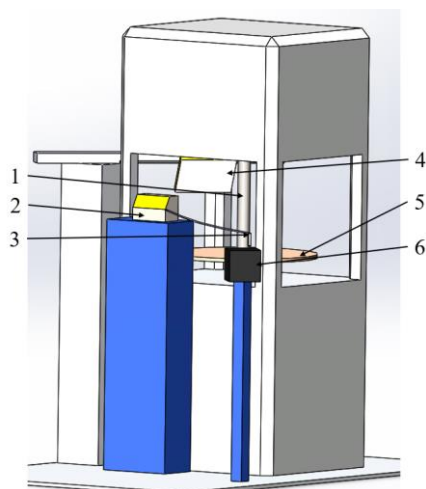


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 — вал, 2 — насос, 3 — канал подачи жидкости, 4 — устройство подсветки, 5 — вращающийся диск, 6 — высокоскоростная камера

Экспериментальные исследования проводились на стенде, схема которого приведена на рис. 1. Основной частью экспериментального стенда является металлический каркас, в котором закреплены электродвигатель, соединенный через муфту с валом. К валу, перпендикулярно, притянут к упорной шайбе диск. Закрепленное отдельно устройство подсветки обеспечивает освещение области съемки. Высокоскоростная камера фиксирует процесс движения капли в воздушном слое, образованном в следствие вращения диска. На рисунке 2 представлены кадры процесса движения капли в воздушном слое.

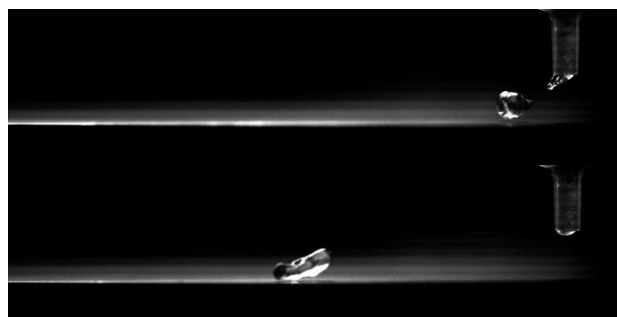


Рис. 2. Видеокадры процесса движения капель эталонной жидкости в поле сил Магнуса.

По результатам исследования получены данные о процессах движения и условиях разрушения капель ВУТ и воды при воздействии сил Магнуса.

Список литературы:

1. Sher, F., Yaqoob, A., Saeed, F., Zhang, S., Jahan, Z., Klemeš, J. J. Torrefied biomass fuels as a renewable alternative to coal in co-firing for power generation. *Energy*. 2020;209:118444. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118444>
2. Syrodoy, S. V., Kuznetsov, G. V., Gutareva, N. Y., Salomatov, V. V. The efficiency of heat transfer through the ash deposits on the heat exchange surfaces by burning coal and coal-water fuels. *Journal of the Energy Institute*. 2018;91(6):1091-1101. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.06.014>
3. Guo, H., Ma, Y., Sun, Y., Liu, M. Gas-liquid mass transfer and reaction characteristics of gas-liquid-solid circulating micro-fluidized bed. *Chemical Engineering Journal*. 2025;503:158249. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158249>

Исследование выполнено за счет гранта РФФ
(проект № 23-79-10092).

ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ПОРИСТЫХ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Сыродой С.В., Тамашевич М., Плюснин А.М., Нигай Н.А., Войткова К.А.

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

В настоящее время технология капельного охлаждения рассматривается как один из наиболее перспективных подходов к решению проблем отвода избыточного тепла от электронных компонентов [1]. Процесс капельного охлаждения может быть дополнительно расширен за счет модификации поверхности, с которой взаимодействуют капли. В рамках данного исследования планируется оценить эффективность пористых поверхностей для оптимизации капельного охлаждения. Пористые материалы могут способствовать лучшему распределению капель и увеличению площади испарения, что потенциально повысит эффективность теплоотвода [2].

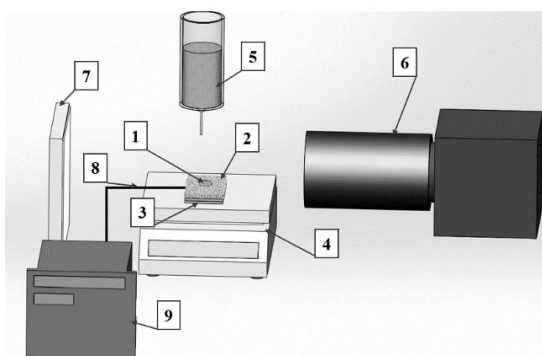


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – Капля; 2 – Пористая поверхность, выполненная из меди; 3 – Медные пластины; 4 – Нагревательная плита; 5 – Шприц с охлаждающей жидкостью; 6 – Высокоскоростная камера; 7 – Прозежектор; 8 – Медь-константановая термопара; 9 – Терморегулятор TPM-148

Эксперименты проводились на установке, приведенной на рисунке 1. Экспериментальный стенд включал в себя нагревательную плиту с закрепленной двухслойной пластиной. Первый слой представлял собой пористую медь. Второй слой медная однородная пластина. Также в состав стенда входил дозатор, подключенный к шприцевому насосу. Для измерения температуры в центральной части подложки устанавливалась медь-константановая термопара. Видеорегистрация процесса испарения проводилась при помощи высокоскоростной камеры Evercam. В качестве охлаждающей жидкости были выбраны вода, спирт, а также его растворы. В экспериментах использовалось 4 вида подложек: пористость верхнего слоя варьировалась в диапазоне - 0,93 - 0,96.

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 2, позволяет сделать вывод, что для чистого спирта увеличение температуры нагревателя не оказывает существенного влияния на время испарения, но с увеличением концентрации воды время испарения существенно возрастает.

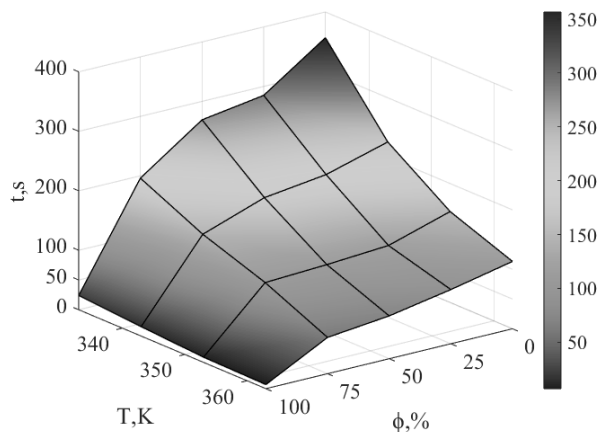


Рис. 2. Зависимость полного времени испарения капли от температуры поверхности (333–363 K) и концентрации спирта (0–100%) на гладкой поверхности

Из представленных на рисунке 3 зависимостей можно сделать вывод о том, что в случае использования воды наиболее эффективное охлаждение достигается на гладкой подложке. Это обусловлено тем, что у воды высокий коэффициент поверхностного натяжения. В результате вода не проникает в поры, соответственно процесс охлаждения деинтенсифицируется.

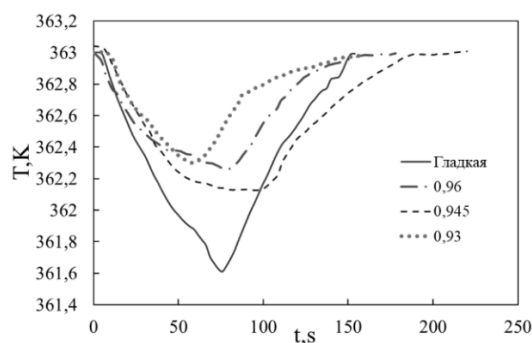


Рис. 3. Зависимость температуры приповерхностного слоя пластины от времени в процессе испарения капли воды при тепловом потоке $q = 140 \text{ кВт/м}^2$ для гладкой пластины и поверхностей с показателем пористости 0,96; 0,945; 0,93.

Список литературы:

1. Wang Q., Li C., Zheng Y., Feng L., Xiong W., Shang Y. Spreading of droplet impact on ribbed superhydrophobic surfaces with varying structure height // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. — 2025. — Т. 704. — С. 135397.
2. Zhang F. F., Tang J. D., Yin H., Che S. Y., Zhao C. Y., Chen J. J., Chen G. Evolutions of liquid droplets impacting on hot porous substrates: spreading, imbibition, and evaporation // *International Journal of Thermal Sciences*. — 2026. — Vol. 220, Part B. — P. 110394.

Работа поддержана РФФ
(грант № 25-79-10045).

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПОЛУОТКРЫТОГО МИКРОКАНАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛОТВОДА

Сыродой С.В., Тамашевич М., Плюснин А.М., Нигай Н.А., Войткова К.А.

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

К настоящему времени разработано множество технологий отвода тепла от электронных устройств: воздушное, погружное, капельное, ручейковое охлаждение и др. Наиболее простое и дешёвое воздушное охлаждение широко применяется в ноутбуках и компьютерах, однако его эффективность ограничена низкой теплоёмкостью и теплопередачей воздуха. Альтернативой служат тонкие жидкие пленки, обеспечивающие высокоинтенсивный теплообмен, что критически важно для микроэлектроники, конденсаторов и испарителей [1]. Особый интерес представляют тонкоплёночные потоки жидкости с двумя трёхфазными линиями контакта, формирующиеся в полуканалах, где интенсивность теплообмена достигает максимальных значений [2,3].

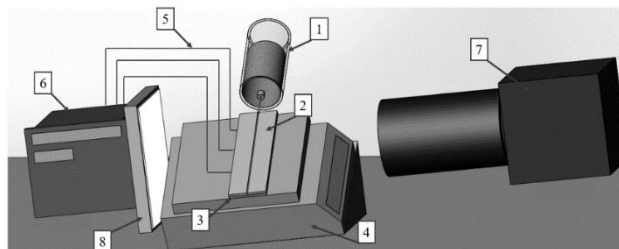


Рис. 1. Экспериментальный стенд:

А – Экспериментальный стенд: 1 – Шприц с жидкостью;
2 – Пластина из нержавеющей стали со штрибой;
3 – Медная пластина; 4 – Нагревательная плита;
5 – Медь-константановые термопары;
6 – терморегулятор ТРМ-138; 7 – Камера evercam;
8 – прожектор.

Для решения данной проблемы был разработан экспериментальный стенд, показанный на рисунке 1. Жидкость с заданным расходом подавалась насосом через шприц (1) на металлическую пластину (2); штриба служила направляющей для потока. Металлическая подложка размещалась на термостатированной нагревательной плите (4). Для измерения температуры в подложке между пластинами из нержавеющей стали (2) и меди (3) устанавливался блок из трёх медь-константановых термопар (5). Процесс растекания и испарения жидкости фиксировался высокоскоростной камерой evercam. Температура поверхности подложки изменялась в диапазоне от 60 до 90 °С. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода.

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 3, позволяет сделать вывод, что наилучшим охлаждающим эффектом обладает пластина с волнообразной штрибой.

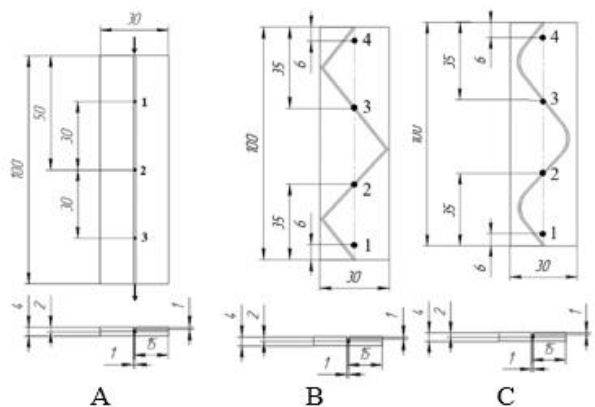


Рис. 2. Экспериментальные пластины с различной геометрией каналов: А – Пластина с прямой штрибой; В – Пластина с зигзагообразной штрибой; С – Пластина с волнообразной штрибой

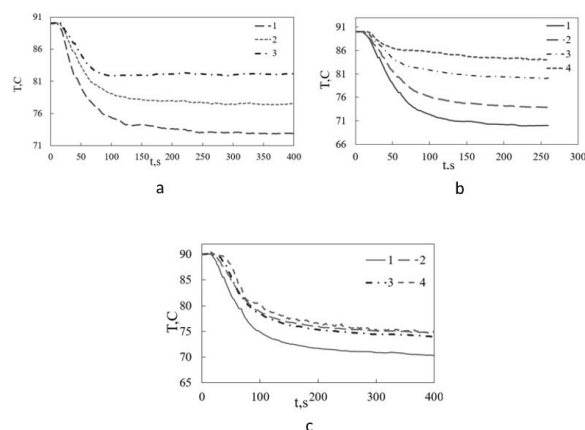


Рис. 3. Зависимость температуры приповерхностного слоя пластины от времени в процессе испарения капли воды при температуре поверхности 90°C для пластин с различной геометрией каналов: а – Пластина с прямой штрибой; б – Пластина с зигзагообразной штрибой; в – Пластина с волнообразной штрибой.

Список литературы:

1. Kabov O. A., Lyulin Yu. V., Marchuk I. V., Zaitsev D. V. Locally heated annular liquid films in microchannels and minichannels // Internar. J. Heat and Fluid Flow. 2007. V. 28. P. 103–112.
2. Sebastia-Saez D., Gu S., Könözy L., Repke J.-U., Arellano-García H. On the effect of the Froude number on the interface area of gravity-driven liquid rivulets. Chemical Engineering Research and Design. 2018;130:208–218. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.12.003
3. Guzanov V., Aktershev S., Bobylev A., Kvon A., Cherdantsev A. Experimental and theoretical study of stationary nonlinear three-dimensional wave regimes on a straight rivulet flowing down an inclined plane. International Journal of Multiphase Flow. 2024; 181:104990. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104990

Работа поддержана РФФ
(грант № 25-79-10045).

ПОТОКИ МИКРОЧАСТИЦ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛАСТИНЫ С РАЗНЫМИ ЗАЗОРАМИ

Халеменчук В.П.¹, Тен К.А.¹, Кашкаров А.О.¹, Прууэл Э.Р.¹,
Туманик А.С.^{1,2}, Асылкаев А.М.^{1,2}, Рубцов И.А.^{1,2}

¹Институт гидродинамики м. М.А. Лаврентьева СО РАН,
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия
²ЦКП «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
Никольский проспект, 1, р.п. Кольцово, 630559, Россия

При выходе сильной ударной волны из металлической поверхности в воздух с поверхности вырывается поток микрочастиц (пыление) [1], [2]. В работе исследовались потоки микрочастиц, формируемые в зазорах (щелях) прямых конструкционных стыков при нагружении ударной волной (УВ) с интенсивностью 40 ГПа. Исследуемые образцы изготавливались из алюминиевого сплава Д16Т и меди марки М1 с зазором от 10 до 50 мкм (рис.1).

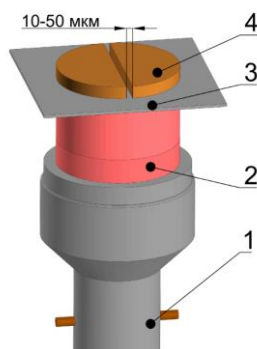


Рис. 1. Экспериментальная сборка с прямым стыком

1- генератор плоской ударной волны; 2- энергетический материал; 3- прокладка; 4- исследуемый образец.

Исследование выброса частиц проводилась на станции «Субмикросекундной диагностики», ускорительного комплекса ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН методом скоростной импульсной рентгенографии синхротронным излучением (рентгеновское кино) [2]. Регистрация рентгеновской тени проводилась однокоординатным детектором DIMEX записывающим 100 кадров с промежутком времени между кадрами 124 нс [3].

Эксперименты проводились в трех постановках – продольной и двух поперечных, по результатам которых, получено объемное движение струй. Проведенные рентгенографические эксперименты позволяют видеть зарождение потоков микрочастиц, их динамику скорости, размеров и массы. На рис.2 показана эволюция размеров и массы струи из щели образца из Д16Т.

Из зазоров алюминиевых и медных образцов струи вылетают со скоростью 5.2 км/с и 3.8 км/с с переменной плотностью. Впереди летит малоплотная часть, затем плотность падает. Основное ядро летит рядом с поверхностью, имеет плотность ~ 1 мг/см³. Массы струй на расстоянии 10 мм от поверхности находятся в пределах 0.96 мг - 1,88 мг (для материала Д16Т) и 3.8 мг – 6.75 мг (для меди).

Это количество микрочастиц (масса) соответствует массе материала, выброшенного из слоя, равного 10 – 20 мкм или 10-20% ширины зазора (с каждой стороны).

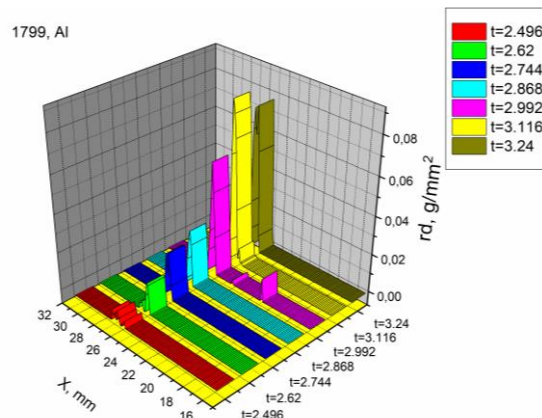


Рис. 2. Динамика размеров и массы струи из алюминиевого образца. Цветными линиями показаны кадры, сделанные через 0,124 мкс.

Проведено предварительное численное моделирование процесса образования потоков микрочастиц, формируемых в зазорах металлов. Начальные условия в расчетах принимались такие же как в экспериментах. Полученные результаты расчётов скорости и плотности потоков микрочастиц оказались ниже измеренных.

Комплексное исследование процесса выброса микрочастиц из зазоров в металлах при воздействии на них сильных ударных волн и возможность численного моделирования позволяет лучше узнать поведение металлических конструкций в момент сильного ударного воздействия.

Список литературы:

1. А.Л. Михайлов, В. Л. Огородников, В. С. Сасик, А. И. Лебедев, Д. Е. Зотов, и др. Экспериментальное исследование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности. // XV Международная конференция Харитоновские научно-тематические чтения «Экстремальное состояние вещества. Детонация. Ударные волны», г. Саров, 18-22 марта 2013 г. С. 279.
2. Халеменчук В.П., Динамика плотности струи при ударном воздействии на металлические пластины / К. А. Тен, Э. Р. Прууэл, А. О. Кашкаров, А. С. Туманик, А. М. Асылкаев, И. А. Рубцов, А. А. Глушак, Е. Б. Смирнов // Известия РАН. Серия физическая, 2025г., том 89, №9, с.1414-1419
3. Shekhtman L.I., Aulchenko V.M., Bondar A.E., Kudryavtsev V.N., et al. GEM-based detectors for SR imaging and particle tracking. // Journal of Instrumentation, Volume 7, Issue 03 (March 2012). – PP. 1-18.

**МЕХАНИЗМЫ УНОСА И ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ЛЕГКОПЛАВКОГО ТОПЛИВА
В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ГОРЯЧЕМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ****Усанов В.А., Сиваков Н.С.**Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
пр-т Вернадского 101 корп. 1, Москва, 119526, Россия

Изучение поведения легкоплавких горючих материалов при воздействии высокотемпературных газовых потоков актуально для широкого круга приложений: от производственных процессов с полимерами и переработки отходов до задач пожаровзрывобезопасности. В отличие от традиционных газифицирующихся полимеров (например, ПММА), где продукты пиролиза блокируют конвективный тепловой поток, легкоплавкие вещества, постепенно прогреваясь слой за слоем, образуют подвижный слой расплава на поверхности. Под действием набегающего потока этот слой диспергирует с образованием капель, которые после уносятся в газовую фазу, что значительно ускоряет регрессию материала. Процесс включает сопряжённые межфазные взаимодействия, фазовые переходы и многофазные течения (развитие неустойчивости на границе расплава с газовым потоком, вследствие воздействия касательных напряжений, а также унос капель), а скорость регрессии зависит не только от свойств самого вещества (плотность, теплоёмкость, температура плавления, поверхностное натяжение), но и от характеристик газового потока (массовый расход, температура, давление). Поэтому исследование закономерностей плавления, диспергирования и горения таких материалов является комплексной научно-технической задачей, требующей совместного применения экспериментальных, аналитических и численных подходов.

Для решения этой задачи на базе экспериментальной установки ИПМех РАН были проведены серии экспериментов. Установка позволяет создавать высокотемпературный поток атмосферного воздуха (или другого окислителя) в широком диапазоне параметров. Рабочая камера, в которую помещается исследуемый образец топлива, снабжена звуковым выходным соплом и смотровыми окнами для высокоскоростной видеорегистрации процессов. Исследуемые образцы изготавливались из парафина марки П-2 в виде прямоугольных брусков со скошенной под 30° входной кромкой. Диапазон рабочих параметров: температура воздуха на входе 600–1000 К, расход 0.05–0.22 кг/с, давление в камере 0.4–2.0 МПа. В настоящей работе подробно приведены данные по скорости регрессии образца, определены границы самовоспламенения топливовоздушной смеси (с предложенной теорией на основе аналогии с реактором идеального перемешивания), а также описаны результаты нескольких показательных экспериментов.

По результатам исследований определена скорость регрессии образца и механизмы, влияющие на нее.

Установлено, что в экспериментах, проведённых в широком диапазоне температур (580–905 К) и массовых расходов воздуха (0,064–0,225 кг/с), линейная скорость регрессии парафина изменялась от 0,2 мм/с (при низких расходах и температурах) до 1 мм/с (при высоких значениях параметров). При этом скорость массовой регрессии как в опытах с воспламенением, так и без него описывается одной и той же билинейной зависимостью, а более высокий разброс данных в режиме горения связан с влиянием продуктов сгорания в рециркуляционной зоне за образцом. В рамках тепловой теории принято, что образующийся на поверхности расплав мгновенно сдувается касательными напряжениями газового потока, поэтому скорость регрессии определяется тепловым балансом между конвективным тепловым потоком и теплотой, необходимой для нагрева и плавления материала. Сравнение с литературными данными показывает, что полученные значения скорости регрессии занимают промежуточное положение между высокоэнергетичными испытаниями в газообразном кислороде и мягкими режимами обдува горячим воздухом без горения [1].

Установлено, что при воспламенении парафина имеется задержка, в зависимости от исходных параметров потока. Для самовоспламенения парафина температура воздушного потока должна быть выше 770К, а расход – 0,11 кг/с. Также из анализа кадров высокоскоростной съёмки видно, что вопреки результатам других исследований, воспламенение происходит не над поверхностью образца, а в застойной зоне за образцом. Использование принудительного воспламенения позволило раздвинуть границы параметров набегающего потока, так пороговое значение температуры на входе в камеру уменьшается на 70К, а расход – на 0,02 кг/с [2].

Проведены исследования влияния геометрических размеров образца, а также наличия искусственных преград на параметры плавления и самовоспламенения образца.

Список литературы:

1. V.A.Usanov, G.V.Gembarzhevskii, S.A.Rashkovskiy, S.E.Yakush. Melting and regression of paraffin samples in hot air flow // Heat Trans. Res. 2025. V. 56, N 1. P. 27–44.
2. V.A. Usanov, G.V. Gembarzhevskii, S.A. Rashkovskiy, S.E. Yakush. Critical conditions for self-ignition of a paraffin slab in high-temperature air flow // Acta Astronautica. 2026. doi: 10.1016/j.actaastro.2025.10.059 (In print).

*Работа поддержана РФФ
(грант № 24-19-00703).*

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОЙ ПОЛИМЕРАЗНОЙ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ НА ОСНОВЕ ЭЙЛЕРОВА И ЛАГРАНЖЕВА ОПИСАНИЙ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД

Уточкин В.Ю., Браун Д.А., Сираев Р.Р.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский пр. 29, Пермь, 614990, Россия

ПЦР представляет собой многократное избирательное циклическое копирование определённого участка нуклеиновой кислоты ДНК при помощи ферментов в искусственных условиях. Количество специфического продукта реакции теоретически возрастает пропорционально $2n$, где n – число циклов реакции. С начала 2000-х продвигается технология конвективной ПЦР (CPCR) на основе естественной конвекции. Эта технология позволяет ускорить проведение реакции ПЦР, уменьшить масштабы амплификаторов до размеров микрореактора. Существующие математические модели для анализа CPCR традиционно предполагают, что раствор ДНК является истинным раствором, в котором молекулы ДНК и растворитель движутся одинаково, как одна фаза, и соответственно описываются одним уравнением Навье-Стокса. Данный подход, несмотря на определенные успехи, имеет и некоторые недостатки. В частности, он не учитывает ситуации, когда молекулы раствора могут вести себя как отдельная дисперсная фаза: вращение раствора в неподвижном сосуде, действие электрического поля, термофорез и т.п. В этом случае поведение фракций молекул ДНК технически проще и физически корректнее может быть описано в рамках многофазной модели жидкой среды. До настоящего времени такие модели для реакции конвективной ПЦР отсутствовали.

В данной работе мы впервые предлагаем математические и численные модели конвективной ПЦР на основе Эйлер-Эйлерового (ЭЭ) и Эйлер-Лагранжева (ЭЛ) методов для многофазных сред. Одноцепочечные (ssDNA), двухцепочечные (dsDNA) и отоженные праймерами (aDNA) молекулы ДНК, представляют собой различные дисперсные фазы, между которыми идет реакция ПЦР. Модель ЭЭ исходит из предположения, что дисперсные фазы, так же как и растворитель являются континуальными средами и описываются с использованием уравнений в Эйлеровом представлении. Модель ЭЛ предполагает, что уравнения динамики среды записываются в рамках описания Эйлера, а движение частицы дисперсной фазы рассчитывается на основе дискретной механики, т.е. в рамках метода Лагранжа. Численные модели реализованы в пакетах ANSYS CFX и Comsol Multiphysics. С целью верификации проведено сравнение с результатами наиболее релевантных теоретических и экспериментальных работ в этой области [1-3]. Показано, что модели хорошо работают: согласуются времена удвоения числа молекул ДНК, конфигурация и динамика полей.

Одним из преимуществ многофазных моделей при работе с дисперсными средами является возможность сравнительно просто учесть физические механизмы, приводящие к появлению относительной скорости между дисперсными частицами и базовой жидкостью.

К таким механизмам можно отнести броуновскую диффузию, термофорез, диффузиофорез, эффект Магнуса и некоторые другие. В качестве демонстрации возможностей предлагаемого метода по сравнению с традиционным однофазным подходом мы учитывали явление термофореза, представляющее собой движение дисперсных частиц в градиенте температур, и, как следствие, означающее способность молекул ДНК перемещаться от тепла к холоду. Этот эффект ранее не рассматривался при моделировании конвективной ПЦР. Вычисления показали, что термофорез существенно влияет на ход реакции – число молекул растет не по экспоненциальному закону, а медленнее. Это отклонение увеличивается по мере протекания реакции и на некоторой ее стадии конкуренция конвективной циркуляции и адвекции, вызванной термофорезом, приводят к возникновению нерегулярных колебаний конвективного течения со сменой направления циркуляции течения. Колебания при термодиффузии известны и описаны в литературе на примере наножидкостей. На этом фоне к популярной среди исследователей на данный момент однофазной модели конвективной ПЦР можно относиться как к модели идеальной реакции, когда рост числа молекул происходит строго по экспоненциальному закону, но не учитываются различные физические эффекты, которые могут существенно повлиять на ход реакции.

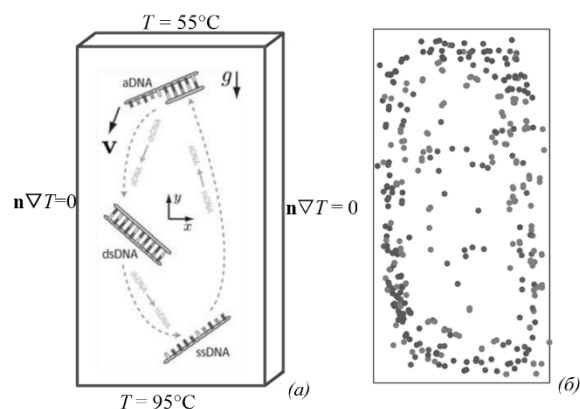


Рис. 1. Схема ПЦР в конвективной ячейке (а); результат ЭЛ моделирования – пост-процессорное изображение частиц кружками нормализованного размера (б)

Список литературы:

1. Krishnan M., Ugaz V.M., Burns M.A. PCR in a Rayleigh-Benard convection cell // Science. 2002. Vol. 298. No. 5594. P.793.
2. Allen J. W., Kenward M., Dorfman K. D. Coupled flow and reaction during natural convection PCR // Microfluid. Nanofluidics. 2009. Vol. 6. P. 121-130.
3. Shu J. I., Baysal O., Qian S., X. Qiu X., Wang F. Performance of convective polymerase chain reaction by doubling time // Int. J. Heat Mass Tran. 2019. Vol. 133. P. 1230-1239.

Работа поддержана РНФ
(грант № 25-11-00338).

ТЕПЛООБМЕН ПУЗЫРЬКОВОГО НИСХОДЯЩЕГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ С ОДИНОЧНОЙ ПРЕГРАДОЙ

Евдокименко И.А., Филиппский К.А., Лобанов П.Д.

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

Двухфазные потоки встречаются во многих отраслях промышленности, таких как авиа- и машиностроение, химическая технология и биотехнологии. Введение газа в форме пузырей в поток может быть причиной увеличения турбулентности и улучшения перемешивания, что в свою очередь может оказывать влияние на теплообмен [1]. Интенсивность тепломассообменных процессов зависит от гидродинамической структуры потока. Ориентация канала в пространстве и направление течения в нем напрямую оказывают влияние на гидродинамическую картину двухфазного потока. Так, например, структура нисходящего потока принципиально отличается от восходящего из-за противоположного направления действия силы Архимеда [2].

Управлять структурой потока можно при помощи введения в канал преград и уступов различных форм. Они создают отрыв в потоке, что позволяет интенсифицировать теплообмен [3]. Известно, что в однофазном потоке с увеличением толщины преграды уменьшается зона рециркуляции потока сразу после преграды [4]. В литературе имеется представление о влиянии двухфазных восходящих потоков на теплообмен, тогда как влияние нисходящих двухфазных потоков практически не исследовано. Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния длины прямоугольной преграды на теплообмен на стенке в нисходящем пузырьковом течении в прямоугольном канале.

Установка представляет собой оргстеклянный канал прямоугольного сечения (200*16*1450 мм) в который подаётся дистиллированная вода, в качестве рабочей жидкости, через регулируемый центробежный насос. Канал установлен вертикально. Для создания нисходящего течения поток вводится в канал сверху через переходник и систему решёток, которые выравнивают поток по ширине канала. Газ подаётся в канал при помощи кольцевого диспергатора, в который установлены 32 капилляра диаметром 0,3 мм.

В канал помещались преграды с прямоугольным сечением размерами 200*8*10 мм ($L/D=1,25$) и 100*8*20 мм ($L/D=2,5$) соответственно. Преграды крепились к каналу на высоте 225 мм от основания канала. Сразу за преградой начинался теплообменный участок. Он представляет собой прямоугольную пластину из нержавеющей стали толщиной 0,15 мм и размерами 130*65 мм. Для создания необходимого теплового потока на пластину подавался ток в 140 А. Температуры с пластины снимались при помощи высокоскоростного тепловизора марки Flir Sc-650.

Эксперименты проводились при числах Рейнольдса от 10000 до 20000, газосодержании от 0 до 3%. Расход жидкости контролировался при помощи ультра-

звукового расходомера. Температура воды поддерживалась постоянной на уровне 25°C при помощи терморегулятора марки ОВЕН.

Было показано, что сразу за преградой $L/D=1,25$ (0-2 z/H) наблюдается зона повышенных температур, что соответствует рециркуляционной зоне за преградой. На расстоянии 2-5 z/H температура стенки снижается, что приводит к росту числа Nu вплоть до достижения его максимума. Область с максимальными значениями Nu соответствует зоне присоединения потока. Далее температура стенки постепенно возрастает на всей длине измерительного участка, что приводит к стабилизации числа Nu, что соответствует зоне релаксации.

Введение пузырьков способствует сокращению области пониженной теплоотдачи, а также смещению зоны максимальной интенсивности теплообмена в направлении преграды. Такой характер изменения можно связать с особенностями движения газовой фазы: проникновение пузырьков в рециркуляционную область за преградой изменяет структуру пристенного течения и градиент скорости вблизи стенки.

Кроме того, показано, что повышение расхода жидкости приводит к увеличению интенсивности теплоотдачи для двух рассмотренных длин преград.

Стоит отметить, что для преграды $L/D=1,25$ введение газа приводит к смещению точки максимума числа Nu ближе к преграде по сравнению с однофазным потоком.

Для преграды $L/D=2,5$ характер теплоотдачи сохраняется. Установлено, что добавление небольшого количества газовой фазы в поток при расходе газосодержании до $\beta = 1$ % практически не изменяет интенсивность теплообмена. Существенное влияние пузырьков проявляется при увеличении газосодержания до 3 %, причём данный эффект наблюдается для обеих исследованных конфигураций преград.

Список литературы:

1. Risso, F. Agitation, Mixing, and Transfers Induced by Bubbles. // Annual Review of Fluid Mechanics. 2018. №50. P. 25-48.
2. Kashinsky, O. N., & Randin, V. V. Downward bubbly flow in a pipe. // International Journal of Multiphase Flow. 1999. № 25(1). P. 109-138.
3. Terekhov V.I., Yarygina N.I., Zhdanov R.F. Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003. № 46. P. 4535-4551.
4. J. van der Kindere, B. Ganapathisubramani. Effect of length of two-dimensional obstacles on characteristics of separation and reattachment. // Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 2018. №178. P. 38-48

*Исследование выполнено в рамках
государственного задания ИТ СО РАН
(126021217044-2)*

БИФУРКАЦИИ И УСТОЙЧИВОСТЬ В ЗАДАЧАХ ТЕОРИИ ФИЛЬТРАЦИИ

Цыпкин Г.Г.

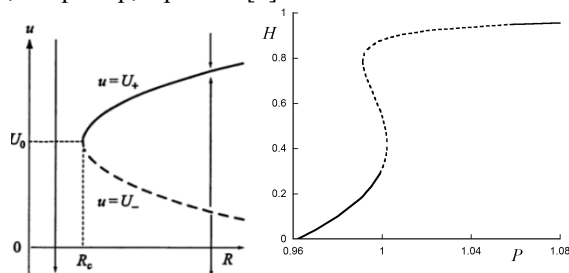
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
пр. Вернадского 101, Москва, 119526, Россия

При рассмотрении задач фильтрации была обнаружена неединственность решений [1,2]. В этом случае возникает вопрос о выборе решения, имеющего физический смысл. Помимо анализа применимости полученных результатов, строго говоря, необходимо провести исследование их устойчивости. Как правило, на первом этапе проводится исследование линейной устойчивости методом нормальных мод [3].

При моделировании геотермальных систем рассмотрение устойчивости поверхности раздела было вызвано наблюдаемыми эффектами. А именно, натурные наблюдения показывают, что в геотермальных системах реализуется устойчивая конфигурация, когда слой воды располагается над слоем перегретого пара [1,4]. Этот факт объясняется большим температурным градиентом, который обеспечивает термодинамические условия существования области пара под водонасыщенной областью на относительно большой глубине.

Аналитические исследования устойчивости таких геотермальных систем были представлены в работе [4]. Найдено, что поверхность раздела устойчива, если коэффициент проницаемости не превышает некоторого критического значения проницаемости пород. В работе [1] модель Шуберта-Штрауса была обобщена на нетривиальный случай, когда базовое решение для невозмущенного состояния допускает фазовый переход и движение воды и пара. Найдено, что при некоторых значениях параметров решение задачи неединственно и могут существовать два или три решения. С изменением параметров решения могут возникать и исчезать в точке бифуркации, которая является точкой поворота. Возникает вопрос о применимости каждого полученного решения.

В классической литературе (например, в [3]) представлены бифуркационные диаграммы точки поворота, на которых к точке бифуркации подходят два решения, одно из которых устойчивое (сплошная линия), а другое неустойчивое (пунктирная линия), как это показано на первом рисунке. Физический пример, отражающий такое поведение решений, был представлен, например, в работе [5].



На втором рисунке приведен пример случая более общего положения, когда имеется область параметров, в которой существует три решения и две точки поворота [6]. Для небольших значений параметра P

существует одно устойчивое решение. При увеличении этого параметра происходит рождение двух неустойчивых решений, одно из которых затем сближается с первым решением, а при их слиянии они исчезают в точке бифуркации. Заметим, что в окрестности точек поворота все решения неустойчивы. Тем не менее, можно подобрать параметры, когда, по крайней мере, в одной точке бифуркации происходит слияние и исчезновение (или рождение) одного устойчивого и одного неустойчивого решения.

Следует подчеркнуть, что потеря устойчивости физической системы при наличии точки поворота в бифуркационной диаграмме базового решения не обязательно происходит в точке бифуркации. Соответственно, для установления факта устойчивости или неустойчивости решения недостаточно проанализировать бифуркационную диаграмму базового решения, но требуется проведения специального исследования. Построенная бифуркационная диаграмма базового решения вместе с исследованием устойчивости дает исчерпывающую информацию о свойствах изучаемой физической системы.

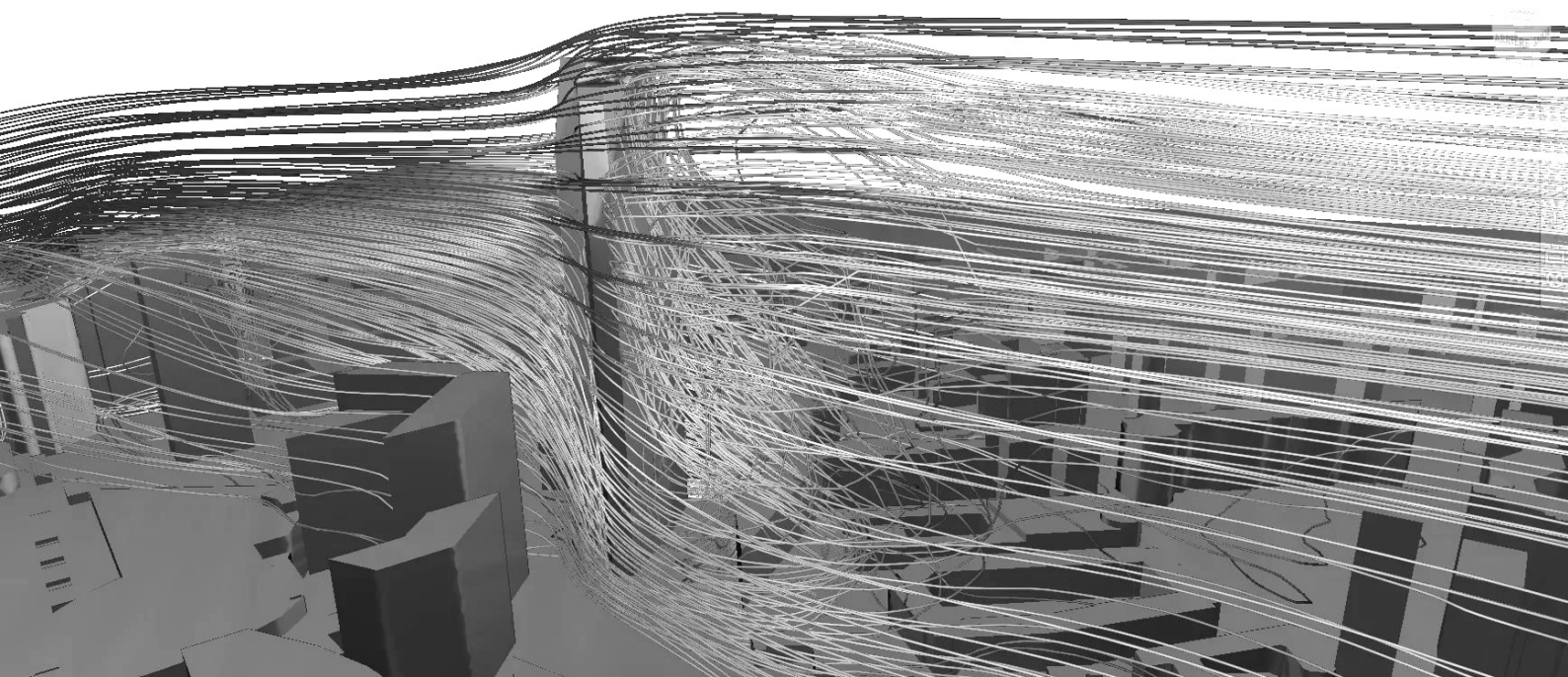
Список литературы:

1. Tsypkin G.G., Il'ichev A.T. Gravitational stability of the water-vapor phase transition interface in geothermal systems // *Transp. Porous Media*. 2004. V. 55, p. 183–199.
2. Tsypkin G.G., Woods A.W. Precipitate formation in a porous rock through evaporation of saline water // *J. Fluid Mech.* 2005. V. 537, p. 34–53.
3. Drazin P.G. *Introduction to hydrodynamic stability*. 2002. Cambridge University Press
4. Schubert G., Straus G.M. Gravitational stability of water over steam in vapor-dominated geothermal system // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85, p. 6505–6512.
5. Ильичев А.Т., Цыпкин Г.Г. Неустойчивость Релея-Тейлора поверхности раздела в несмачиваемой пористой среде // *Изв. РАН. МЖГ*. 2007. N 1, 96–104.
6. Tsypkin G.G. Bifurcations and stability of phase transition fronts in geothermal reservoirs // *Fluid Dynamics*. 2024. V. 59. No. 4, p. 732–740.

Работа поддержана РНФ
(грант № 24-11-00222).

СЕКЦИЯ 3

Экспериментальные и численные методы, методы искусственного интеллекта в теплофизике и гидрогазодинамике



АЛГОРИТМ ДЛЯ БЫСТРОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОТРОНОВ

Квасников Л.Г., Коваленко П.В., Орлов А.Д., Андриященко В.А., Смовж Д.В.

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

Плазменные технологии прочно входят в современную промышленность, находя применение в синтезе материалов, нанесении покрытий, плазмохимии, утилизации отходов и других областях. Управляемость и эффективность данных технологий напрямую зависят от контроля параметров потоков, генерируемых плазмотронами. Проектирование и оптимизация плазменных систем требуют глубокого понимания взаимосвязанных тепловых, газодинамических и электромагнитных процессов, что делает математическое моделирование плазмотронов важным исследовательским инструментом. Данный факт подтверждается постоянным вниманием к теме со стороны научного сообщества [1-3].

Представляемая работа посвящена развитию методологии расчёта не только пространственных полей (температуры, скорости), но и интегральных параметров плазмотронов. Рассматриваемые величины определяют требования к системам электропитания, эффективность преобразования энергии, а также технологические возможности создаваемых плазменных установок. Особый акцент в работе сделан на учёте влияния типа рабочего газа, поскольку его физико-химические свойства кардинально меняют энергетику разряда. Основной целью данной работы является создание математического алгоритма и программного инструмента для расчёта распределения температуры в каналах различных плазмотронов.

Физическая модель строится на ряде допущений, типичных для инженерного моделирования подобных систем: локальное термодинамическое равновесие, стационарный поток, оптическая тонкость плазмы, осевая симметрия. Математическим ядром модели является система уравнений сохранения, описывающая плазму как сплошную проводящую среду. Непосредственно решаются уравнения Навье-Стокса, уравнение неразрывности и уравнение баланса энергии, включающее конвективный и кондуктивный перенос.

Для численного решения этой краевой задачи был выбран метод контрольного объёма. Дискретизация конвективно-диффузионного члена выполнена по схеме степенного закона [4]. Для обеспечения сходимости итерационного процесса, вызванной сильной нелинейностью источников члена, применена его линеаризация. Получаемая на каждом шаге итераций система линейных алгебраических уравнений с трёхдиагональной матрицей эффективно решается классическим методом прогонки. В модели предусмотрена возможность выбора газа: аргона, азота, водорода, воды (пара) и воздуха. Для каждого из них в алгоритм заложены температурные зависимости ключевых свойств: теплопроводности, удельной теплоёмкости, плотности, энтальпии, электропроводности, объёмной излучательной способности.

Алгоритм расчёта был реализован на языке Python, что обеспечило хороший баланс между производительностью, удобством разработки и доступностью. Критичные по производительности участки кода (расчёт свойств, сборка матрицы, метод прогонки) были ускорены с помощью JIT-компиляции библиотекой Numba, что позволило работать с детальными расчётными сетками. Программа имеет модульную структуру, разделённую на блоки: конфигурации, расчёта физических свойств, численного решателя и управления расчётами.

Проведённые серии расчётов продемонстрировали физическую адекватность модели. Форма и характер распределения изотерм в различных режимах показали хорошее качественное согласие с данными [3]. Кроме того, рассчитанное распределение плотности джоулева энерговыделения для высокочастотного плазмотрона коррелирует с результатами, полученными в ряде исследований, например, [5]. Сравнение демонстрирует, что в рамках принятых допущений модель корректно воспроизводит основные физические эффекты.

В рамках работы успешно разработана и реализована комплексная численная модель для расчёта стационарных температурных полей в осесимметричных плазмотронах. Модель, основанная на методе контрольных объёмов, учитывает основные физические процессы: конвективный и кондуктивный перенос энергии, джоулев нагрев, радиационные потери для разных типов разряда. Созданный на её основе программный комплекс, представляет собой практический инструмент для инженерных расчётов и исследовательского анализа. Результаты демонстрируют физическую правдоподобность и качественно согласуются с литературными данными, что свидетельствует об адекватности выбранных подходов. Разработанная модель может служить основой для дальнейшей оптимизации конструктивных и режимных параметров технологических плазмотронов, а также быть расширена за счёт учёта дополнительных факторов, таких как детальный химический состав плазмы.

Список литературы:

1. Thermal plasmas / M. I. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender; Springer Science & Business Media, 1994. 452 p.
2. Heberlein J., Murphy A.B. Thermal plasma waste treatment // Journal of Physics D: Applied Physics. 2008. V. 41, N 5. P. 053001.
3. Основы математического моделирования плазмотронов. Часть I. Учебное пособие / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов; СПб: Изд-во. Политехн. ун-та, 2013. 228 с.
4. Numerical heat transfer and fluid flow / S. Patankar; CRC press, 2018. 197 p.
5. Гришин Ю.М., Мяо Л. Численное моделирование плазмодинамических процессов в технологическом ВЧИ-плазмотроне с газовым охлаждением // Машиностроение и компьютерные технологии. 2016. №. 5. С. 104–121.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации (грант № 075-15-2025-572)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В КОНВЕКТИВНОЙ КОЛОНКЕ НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Архипов В.А.¹, Басалаев С.А.¹, Данейко О.И.^{1,2}, Матвиенко О.В.^{1,2}, Перфильева К.Г.¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
пр. Ленина 36, Томск, 634050, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
пл. Соляная, 2, Томск, 634003, Россия

Ежегодно в мире происходит большое количество природных пожаров. По статистике, среди всех видов лесных пожаров доминирующее место занимают низовые, при которых горение распространяется по надпочвенному покрову и нижним ярусам растительности, формируя конвективную колонку. Основным способом тушения такого типа пожара является сброс хладагента с борта летательного аппарата. Эффективность данного метода зависит от учета параметров конвективной колонки. В настоящее время существуют упрощенные физико-математические модели для расчета условий сброса хладагента при авиационном тушении пожаров, например [1, 2]. Однако, возможность применения этих моделей ограничена, так как они недостаточно полно учитывают совокупность ключевых факторов, определяющих процесс. К этим факторам относятся параметры восходящего нагретого потока от очага пожара, турбулентность атмосферного воздуха, процесс осаждения и взаимодействия жидко-капельного облака со средой вблизи очага пожара.

В работе представлены результаты модификации физико-математической модели [2], обеспечивающие моделирование структуры течения, характеристик турбулентности и теплообмена в конвективной колонке, возникающей при низовом лесном пожаре.

Математическая постановка задачи выполнена в осесимметричной постановке в цилиндрической системе координат. Очаг пожара моделируется кольцевой областью горения (внутренняя зона – выгоревший участок). Для описания структуры течения, теплообмена и массопереноса в конвективной колонке используются уравнения Рейнольдса, SST модель турбулентности, уравнение энергии, а также уравнение состояния.

Численное решение выполнялось методом конечных объемов на шахматной сетке (4000 узлов по вертикальной оси, 5000 по радиальной со сгущением в областях больших градиентов). Уравнение неразрывности удовлетворялось с помощью алгоритма SIMPLEC. При численном моделировании варьировались основные параметры – радиус очага горения $R_0 = (2 \div 8)$ м, высота зоны горения $h_0 = (0.5 \div 2)$ м, средняя температура в очаге пожара $T_0 \approx 900$ К, скорость восходящего потока $u_0 = (0.5 \div 2)$ м/с.

В результате расчетов показано, что вблизи очага пожара структура потока характеризуется наличием центральной области (ядро потока), где газ движется с одинаковой скоростью и радиальным слоем смешения. Установлено, что на начальном участке ядро потока имеет постоянную температуру, равную начальной. С высотой перемещения потока по конвективной

колонке происходит охлаждение внешних слоев и их смещение к оси колонки.

С увеличением R_0 охлаждение внутренних слоев колонки замедляется, то есть воздушные массы успевают подняться на большую высоту по оси z прежде, чем наступит их охлаждение. Рост u_0 также увеличивает высоту переноса нагретых газов, но из-за интенсификации турбулентности, зависимость температуры от u_0 становится нелинейной. Типичная зависимость температуры на оси колонки по высоте вертикальной координаты приведена на рис. 1.

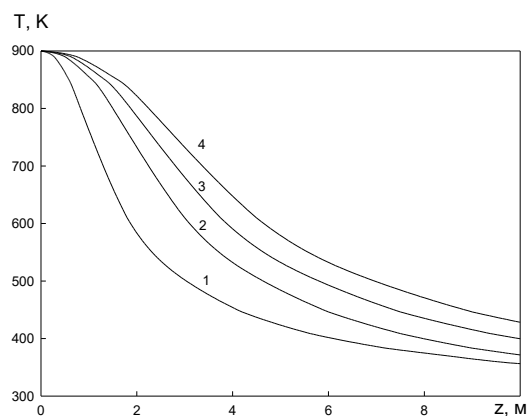


Рис. 1. Зависимость $T(z)$ при $u_0 = 0.5$ м/с (1); 1.0 м/с (2); 1.5 м/с (3); 2.0 м/с (4)

Показано, что по мере подъема воздуха его скорость снижается. Увеличение R_0 увеличивает скорость потока в конвективной колонке. Режим течения в ядре конвективной колонки близок к ламинарному за счет низкой интенсивности генерации турбулентности. Область повышенной турбулентности зарождается вблизи подстилающей поверхности на границе зоны горения. С высотой область турбулентного течения расширяется во внутреннюю и внешнюю область, достигая максимума на основном участке, затем течение реламинируется. Повышение R_0 и u_0 увеличивает размеры турбулизованной зоны и кинетическую энергию пульсаций.

Список литературы:

1. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Кузнецов А.Е., Федоткин Д.В., Москвиллин Е.А., Стрижак П.А., Карпов В.Н. Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров // Пожарная безопасность. 2015. № 2. С. 49-55.
2. Матвиенко О.В., Архипов В.А., Данейко О.И., Усанина А.С., Басалаев С.А., Булавко А.М. Математическая модель расчета поверхностной интенсивности подачи хладагента при авиационном тушении низовых лесных пожаров // Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97, № 4. С. 984-995.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-19-00307-П,
<https://rscf.ru/project/22-19-00307/>

КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ЛИТИЯ В РАСТВОРЕ « $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{LiCl}$ » ГАЗОГИДРАТНЫМ МЕТОДОМ: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Гец К.В.^{1,2}, Жданов Р.К.^{1,2}, Божко Ю.Ю.^{1,2}, Белослудов В.Р.^{1,2}

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

² Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
пр. Лаврентьева 3, Новосибирск, 630090, Россия

Подземные, пластовые, и подтоварные воды нефтяных месторождений могут содержать значительные концентрации лития [1]. Одним из перспективных способов его извлечения является газогидратный метод. Он основан на формировании кристаллического каркаса из молекул воды, в полостях которого удерживаются молекулы-гости (например, метан или углекислый газ) [2]. Ионы лития, подобно компонентам морской соли или тяжелых металлов, не встраиваются в структуру гидрата. Это позволяет одновременно очищать воду и концентрировать литий в оставшемся растворе.

Работа посвящена исследованию влияния концентрации ионов лития на процесс образования клатратных гидратов из метастабильного пересыщенного водного раствора. Моделирование выполнялось в программном пакете LAMMPS в рамках NPT-ансамбля при температуре 275 К и давлении 100 бар; шаг интегрирования составил 2 фс. Для описания молекул воды применялась четырехточечная модель TIP4P/Ice, для молекул диоксида углерода — потенциал OPLS-UA, а для ионов Li^+ и Cl^- — потенциал Madrid-2019. Структурные изменения происходящие в объеме воды характеризовались числами водородных связей, долгоживущих водородных связей, а также параметров порядка, количественно описывающих схожесть ближнего порядка молекул воды и правильного тетраэдрического упорядочения в кристаллических фазах, а также межмолекулярных торсионных углов воды, которые могут значительно различаться в случаях льда, воды и гидрата.

Исходные гомогенные растворы «вода — углекислый газ — хлорид лития» формировались с помощью программного пакета PackMol путём случайного распределения 1200 молекул H_2O , 111 молекул CO_2 (в одночастичном приближении) и 0/6/24/48 пар ионов Li^+Cl^- . Выбранное количество молекул воды достаточно для достоверного описания физических и термодинамических свойств системы. Заданная концентрация растворённого газа позволяет снизить индукционное время и минимизировать вероятность фазового расслоения раствора [3], что необходимо для корректной оценки влияния лития на кинетику гидратообразования. Варьирование содержания соли лития в указанном диапазоне позволяет исследовать эффективность процессов многоэтапной очистки воды и концентрирования лития газогидратным методом, что было продемонстрировано нами ранее для метана и более низкого содержания лития [4].

Для уменьшения влияния стохастичности процесса нуклеации для каждого состава системы было создано по 3 структуры с различным объёмным распределением частиц и начальными скоростями.

Результаты работы показывают, что введение незначительных количеств хлорида лития деструктурирует ближний порядок водной фазы. Анализ параметров ориентационного упорядочения выявил противоположные тенденции: вблизи молекул метана наблюдается формирование более организованной сетки водородных связей, тогда как в окрестности ионов Li^+ и Cl^- происходит её разрушение. Упорядочивающий эффект метана обусловлен его гидрофобной природой. Стоит отметить, что при исследованных в данной работе низких концентрациях соли лития общее влияние на объёмные свойства раствора остаётся слабо выраженным. Тем не менее, дальнейший рост содержания лития (выше 7-8 мол.%) в системе способен радикально ингибировать процесс гидратообразования, вплоть до полного прекращения роста кристаллов при заданных термодинамических параметрах.

В работе проведён количественный анализ формирования гидратных и топологически близких полостей. Установлено, что в исследованном диапазоне низких концентраций хлорида лития качественный характер процесса остаётся неизменным. Рост содержания LiCl в системе коррелирует с уменьшением числа правильных больших полостей и умеренным увеличением доли дефектных (гидратоподобных) ячеек, что обусловлено перестройкой сетки водородных связей. При этом присутствие растворённой соли не оказывает выраженного влияния на длительность индукционного периода нуклеации гидрата, что, однако, требует дополнительных более масштабных исследований влияния стохастики на процесс гидратообразования.

Список литературы:

1. Dugamin E.J., Richard A., Cathelineau M., Boiron M.C., Despinos F., Brisset A. Groundwater in sedimentary basins as potential lithium resource: a global prospective study // Sci. Rep. 2021. V. 11, N. 1. P. 21091.
2. Yu Y.S., Zhang X., Liu J.W., Lee Y., Li X.S. Natural gas hydrate resources and hydrate technologies: a review and analysis of the associated energy and global warming challenges // EES. 2021. V. 14, N. 11. P. 5611-5668.
3. Belosludov V.R., Gets K.V., Zhdanov R.K., Bozhko Y.Y., Belosludov V.R., Chen L.-J., Kawazoe Y. Molecular dynamics study of clathrate-like ordering of water in supersaturated methane solution at low pressure // Molecules. 2023. V. 28, N. 7. P. 2960.
4. Gets K.V., Zhdanov R.K., Bozhko Y.Y., Subbotin O.S., Belosludov V.R. Molecular dynamics study of the lithium compound additive effect on water structure local order and hydrate formation process at early stages // J. Mol. Liq. 2026. V. 453. P. 129542.

Работа поддержана РНФ
(грант № 25-19-00816,
<https://rscf.ru/project/25-19-00816/>).

ЭВОЛЮЦИЯ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ ТУМАННОСТИ ПОСЛЕ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ОТ ВЗРЫВА СВЕРХНОВОЙ ЗВЕЗДЫ

Рыбакин Б.П.¹, Горячев В.Д.²

¹ НИЦ "Курчатовский институт", МГУ им. М.В.Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991, Россия

² Тверской государственный технический университет,
наб. Афанасия Никитина, 22, Тверь, 170026, Россия

В разнообразных коллизиях в межзвездном пространстве происходит непрерывное перераспределение вещества. Эти процессы идут при воздействии струйных потоков газа, при распространении в окружающем пространстве остатков сверхновых, при выбросах плазмы из атмосферы умирающих звезд (звездного ветра). Во всех этих ситуациях возникает уплотнение вещества молекулярных облаков.

Наблюдения туманностей указывают на зависимость их реологии от скоростных полей внешних потоков. Во многих случаях в молекулярных облаках наблюдается образование вихревых кольцевых и филаментарных сгущений. Примером формирования таких сгущений может служить изображение туманности из ионизированного газа от сброшенной оболочки звезды AFGL 2591-VLA3 [1] (Рис. 1).



Рис.1. Область звездообразования в окрестности AFGL 2591. Gemini Observatory (processing by C. Aspin)

При обработке данных были выявлены четыре расширяющихся вихревых кольца и установлена их активность в перестройке облака. При возникновении в сгущениях облаков гравитационной неустойчивости возможен их коллапс и образование протозвездных зон.

В представляемом докладе приводятся результаты численного моделирования взаимодействия ударной волны от взрыва сверхновой звезды с системой из двух, первоначально шарообразных, молекулярных облаков разной массы, с различным пространственным распределением вещества в них. Моделирование велось на основе численного решения уравнений Эйлера, с использованием сеток с числом узлов более двух миллиардов. Анализ изменений плотности, энергии и давления газа при формоизменении туманности проведен на основе данных моделирования эволюции облачной системы за время более миллиона земных лет. Численный эксперимент проведен с использованием авторизованной программы с CPU/GPU распараллеливанием [2].

В настоящей работе показано как неустойчивость Кельвина-Гельмгольца влияет на формообразование туманности, на изменение структуры возникающих кольцевых, подковообразных и филаментарных сгущений. Проведен анализ морфинга туманности, изменения плотности сгущений и завихренности, турбулизации газа при размыкании каскадов вихрей и пространственных изменений слоевых, кольцевых и филаментарных сгущений (Рис. 2).

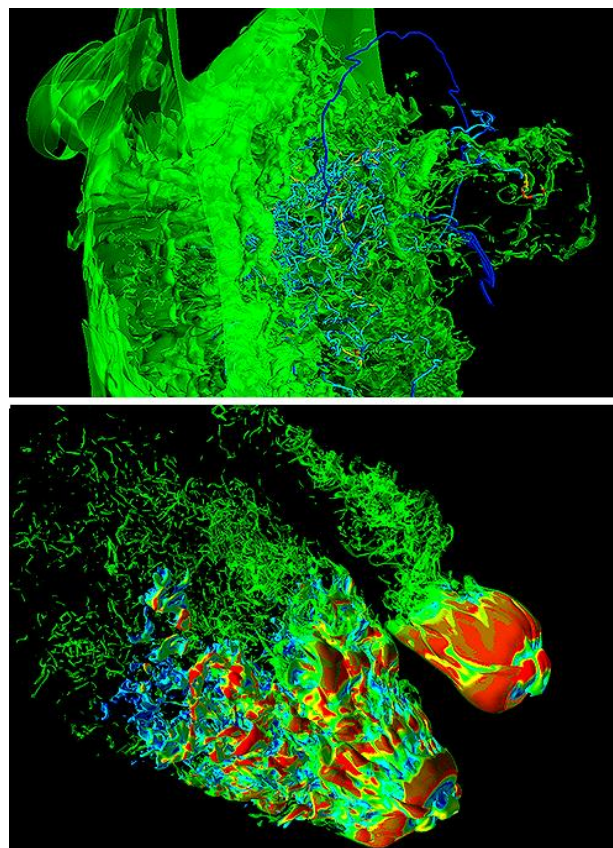


Рис.2. Поля завихренности в кольцевых сгущениях и образовавшиеся филаменты ($t = 300000, 600000$ лет)

Выявлены области гравитационно ограниченных сгущений с контрастностью плотности газа, достигающей десятков тысяч. Результаты моделирования сопоставлены с известными наблюдениями волнообразного изменения формы головных зон облаков и струйных потоков с осцилляциями Кармана при эволюции молекулярных облаков.

Список литературы:

1. Gieser C., Semenov D. et al. Chemical complexity in high-mass star formation: An observational and modeling case study of the AFGL 2591 VLA 3 hot core // A&A, 2019, Vol. 631, A142, P. 21.
2. Rybakin B., Goryachev V. Modeling of density stratification and filamentous structure formation in molecular clouds after shock wave collision // Computer & Fluids, 2018, Vol. 173, P. 189–194.

О РАЦИОНАЛЬНОМ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

Дектерев А.А.

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

Доклад посвящен анализу подходов к математическому моделированию процессов гидродинамики, теплообмена и горения в энергетическом оборудовании. Представлены опыт автора и его коллег по выбору и обоснованию математических моделей, алгоритмов их решения, анализу результатов расчетных исследований и материалы по разработке специализированного CFD ПО.

Комплекс физико-химических процессов, протекающих в энергетическом оборудовании - это пространственное турбулентное течение; сложный и сопряженный теплообмен (теплопроводность, конвекция, излучение); процессы в многофазной среде. При анализе горения топлива необходимо моделировать химическое реагирование с тепловыделением и превращением компонент. Для жидкого топлива - это процесс истечения жидких струй, их распад на капли, дробление и испарение капель. Для твердого угольного топлива - сушка и пиролиз отдельных частиц, выгорание коксового остатка, взаимодействие с поверхностями нагрева. Кроме того что комплекс физико-химических процессов связан между собой, обычно все происходит в трехмерной области и в динамике (нестационарные граничные условия, подвижные твердые элементы, прецессия вихревых структур, распад пленки жидкости и др.). Как правило, разные процессы имеют существенно различающиеся пространственные и временные масштабы, что требует использования динамической локально измельченной по пространству адаптируемой расчетной сетки и специальных алгоритмов расщепления и интегрирования по времени. Все это существенно усложняет моделирование.

Математическая модель энергетической установки должна с достаточной точностью учитывать все физико-химические процессы, при этом, когда говорим о рациональном математическом моделировании, мы должны получать полезные для анализа работы устройства результаты (качественно) в приемлемые сроки на доступной вычислительной технике (быстро), результаты моделирования должны быть реализуемы на практике.

Важный этап работы с математической моделью - это ее тестирование. Для тестирования математической модели стоит использовать данные, корректность которых подтверждена другими исследователями. Неправильные результаты расчетов часто получаются из-за ошибок в исходных данных, поэтому при первичном анализе результатов моделирования необходимо проверять их на логичность, симметрию - если она должна быть, сохранение материальных и тепловых балансов.

Далее необходимо проверить сходимость результатов на расчетных сетках разной детализации. Если есть возможность, то попробовать повысить порядок

аппроксимации отдельных членов уравнений. Следующий шаг - это проверка правильности выбора подмодели соответствующего процесса - турбулентности, радиационного переноса, горения и т.д. Анализируя данные моделирования, стоит попытаться их объяснить, а не только констатировать результат расчета.

Для расчетов использовались: коммерческий пакет ANSYS Fluent; собственное CFD ПО SigmaFlow. При моделировании течений применялись RANS, URANS, Hybrid RANF/LES и LES модели турбулентности. Моделирование распыла основывалось на VOF методике решения задач со свободной поверхностью. При моделировании теплообмена решались задачи сопряженного теплообмена с привлечением DO модели радиационного обмена. Горение описывалось глобальными и детальными механизмами с применением FGM или EDC моделей.

Представлены математические модели, как для канонических тестовых задач, так и для реального энергетического оборудования: форсунки, горелочные устройства, камеры сгорания газотурбинных установок, топочные камеры пылеугольных котлов (Рис.1).

В докладе автор, на примере результатов собственных исследований, делает попытку сформулировать подходы к рациональному математическому моделированию процессов гидродинамики, теплообмена и горения с ориентацией на энергетическое оборудование.

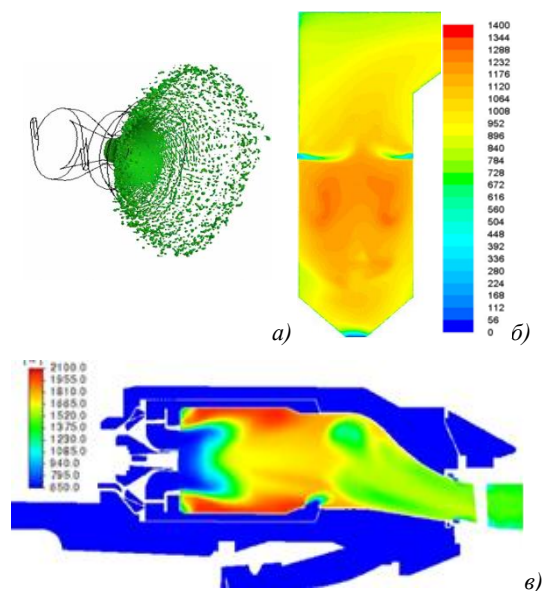


Рис.1. Результаты моделирования: а) форсунка;
б) топочная камера; в) камера сгорания ГТУ

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№126021217042-8).

ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРЕНИЯ В МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТУ

Дектерев Ар.А., Дектерев А.А., Филимонов С.А.

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

К современным газотурбинным установкам предъявляются жесткие требования по объему вредных выбросов оксидов азота и углерода. Для обеспечения этих требований проектируются малоэмиссионные камеры сгорания (МЭКС), однако, при минимизации вредных выбросов могут возникнуть негативные эффекты, такие как «бедный» срыв пламени или виброгорение.

В камерах сгорания нестационарные пульсационные явления могут иметь разную физическую природу. Их высокоамплитудные проявления крайне нежелательны, поскольку часто приводят к большим и разрушительным колебаниям потока и скорости выделения тепла, которые могут вызвать структурные повреждения, чрезмерную вибрацию и шум, обратное воспламенение, срыв пламени, ухудшение экологических характеристик системы сгорания [1].

Целью работы является отработка методики математического моделирования процессов в малоэмиссионной камере сгорания, предложенной ВТИ для российской энергетической газотурбинной установки ГТУ-110М [2,3]. Трубно-кольцевая камера сгорания содержит 20 жаровых труб. (рис.1). Выполнялось моделирование как для одиночного отсека в периодической постановке, так и для полной сборки с 20-ю горелочными устройствами.



Рис. 1. Геометрия полной сборки МЭКС

Математическая модель камеры сгорания основана на уравнениях, описывающих нестационарную турбулентную аэродинамику сжимаемого газа, сложный теплообмен и химическую кинетику. Модель реализована в коммерческом CFD ПО ANSYS Fluent. Рассматривались расчетные сетки различной детализации от 3 млн. расчетных ячеек для одиночного горелочного отсека до сеток, содержащих более 80 млн. ячеек для полной сборки МЭКС.

Математическая модель оптимизирована на основе результатов методических расчетов и адаптирована с использованием данных лабораторного эксперимента, проведенного на стендах в ВТИ и ЦИАМ.

Для описания течения использовались как RANS модель $k-\omega$ SST в стационарной и нестационарной постановках, так и гибридный метод SBES [4], объединяющий модель $k-\omega$ SST и вихреразрешающую модель LES в рамках нестационарного подхода.

Для расчета радиационного теплообмена применялась модель дискретных ординат. Для расчета коэффициента поглощения среды использовалась модель взвешенной суммы серых газов. Горение метана описывалось моделью Flamelet Generated Manifolds (FGM) с детальным механизмом GRI 3.0, содержащим 53 химических компонента и 325 элементарных реакций.

Вычисления NOx выполнялись в схеме постпроцессинга с применением термических и быстрых механизмов.

Разработанная методика позволяет в приемлемые сроки выполнять оптимизационные расчеты МЭКС для отработки конструктивных модификаций при различных режимных параметрах для снижения выбросов NOx и анализа пульсационных характеристик. На рис.2. показаны поле температуры в сечении, и спектр пульсаций давления для одного из вариантов расчета, характерные для МЭКС (Рис.2.)

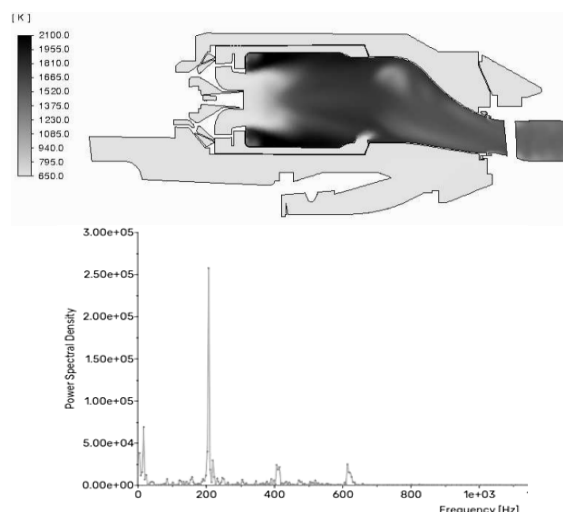


Рис. 2. Осредненная температура в сечении камеры сгорания и спектр пульсаций давления

Список литературы:

1. Aimee S. Morgans and Dong Yang Thermoacoustic Instability in Combustors. Annual Review of Fluid Mechanics 2025. 57: 9–33
2. Л.А. Булысова, В.Д. Васильев Научные проблемы и достижения в разработке и исследовании камер сгорания ГТУ. LXIX научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин. Сборник докладов. 2022 г., Санкт-Петербург, С. 208-213.
3. В.Д. Васильев, Л.А. Булысова, А.Л. Берне Влияние эпоры концентрации топливоздушнoй смеси на динамические процессы в малоэмиссионной камере сгорания. Теплоэнергетика, №12, 2016, С. 35–41
4. Menter F.R. Stress-Blended Eddy Simulation (SBES)-A new Paradigm in hybrid RANS-LES Modeling. Sixth HRLM Symposium, 2016, Strasbourg University, France, 5 p.
- 5.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования Рос-
сийской Федерации, Соглашение №075-15-2025-572.*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛАСТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЯХ РЕЛАКСАЦИИ ПОЛИМЕРНОЙ МОЛЕКУЛЫ

Денисенко В.В., Фортова С.В.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша,
Миусская пл. 4, Москва, 125047, Россия

Вязкоупругие жидкости широко распространены в природе и создаются для различных технических и медицинских применений. Жидкость может приобретать вязкоупругие свойства в результате добавления полимерных молекул, которые существенно влияют на ее динамику.

Добавление даже малого количества полимеров в ламинарный поток, динамика которого характеризуется малым числом Рейнольдса $Re \ll 1$, может существенно изменить его свойства и создать новую форму турбулентности, называемую эластической (упругой) турбулентностью [1]. Влияние упругих сил, действующих со стороны деформированных полимеров на течение, описывается безразмерным параметром - числом Вайсенберга $Wi = U/L\gamma_0$, которое определяется как отношение характерного времени релаксации полимерной молекулы $1/\gamma_0$ до ее равновесного состояния к характерному времени потока жидкости L/U .

В работе численно исследуется феномен эластической турбулентности, возникающей в течении полимерного раствора при низких числах Рейнольдса $Re \sim 4$, высоких числах Вайсенберга $Wi \sim 10^3$ и различных моделях релаксации полимерной молекулы. Использовались модели релаксации Oldroyd-B:

$$\gamma(R) = \gamma_0 \quad [2] \text{ и FENE-P: } \gamma(R) = \frac{\gamma_0}{1 - R^2/R_{\max}^2} \quad [3], \text{ где}$$

γ_0 – коэффициент релаксации полимерной молекулы, $R_{\max}$ – величина максимального растяжения полимерной молекулы. Модель течения полимерного раствора аппроксимируется гибридной численной методикой. Уравнения, описывающие гидродинамическую составляющую потока аппроксимируются линеаризованным методом Годунова [4]. Уравнения переноса для полимерной компоненты аппроксимируются методом Курганова-Тедмора [5]. Представлен численный анализ течения в квадратной расчетной области с периодическими граничными условиями под действием внешней периодической силы (течение Колмогорова).

Система модельных уравнений, описывающих динамику слабосжимаемого вязкого полимерного раствора включает уравнения законов сохранения массы, импульса, уравнения энергии и переноса для полимерной компоненты, характеризующейся вектором $\mathbf{R} = (R^x, R^y)$, который определяет направление деформации молекулы полимера [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) &= 0, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho G \sin ky (\cos kx - 1) + \mu \Delta u + A \frac{\partial}{\partial x} [\gamma(R) \{R^x\}^2] + A \frac{\partial}{\partial y} [\gamma(R) R^x R^y], \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho G \sin kx (\cos ky - 1) + \mu \Delta v + A \frac{\partial}{\partial y} [\gamma(R) \{R^y\}^2] + A \frac{\partial}{\partial x} [\gamma(R) R^x R^y], \\ \frac{\partial (\frac{\rho V^2}{2} + e)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\mathbf{V} \left(\frac{\rho V^2}{2} + p + e \right) \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + A \gamma(R) [u \{R^x\}^2 + v R^x R^y] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(u \frac{\partial u}{\partial y} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) + A \gamma(R) [v \{R^y\}^2 + u R^x R^y], \\ \frac{\partial R^x}{\partial t} + u \frac{\partial R^x}{\partial x} + v \frac{\partial R^x}{\partial y} - R^x \frac{\partial u}{\partial x} - R^y \frac{\partial u}{\partial y} + \gamma(R) R^x &= 0, \\ \frac{\partial R^y}{\partial t} + u \frac{\partial R^y}{\partial x} + v \frac{\partial R^y}{\partial y} - R^x \frac{\partial v}{\partial x} - R^y \frac{\partial v}{\partial y} + \gamma(R) R^y &= 0, \\ p &= \frac{2}{3} \rho e. \end{aligned}$$

Здесь A – коэффициент обратного влияния полимеров на течение, G – интенсивность внешней силы.

В результате исследований было получено, что течение раствора, релаксация полимерной компоненты которого описывается моделью FENE-P отличается от модели Oldroyd-B более сглаженными полями гидродинамических параметров и поля растяжений $\mathbf{R}$. Построены спектры флуктуаций скорости $E_v(k)$, завихренности $E_\omega(k)$ и растяжения полимеров $E_R(k)$. В спектрах наблюдается инерционный диапазон энергетического каскада с показателями для гидродинамического потока $E_v(k) \sim k^{-5}$, для каскада растяжений полимерных молекул $E_R(k) \sim k^{-3}$. Показатели наклонов инерционных интервалов не зависят от вида используемой модели упругости полимерных молекул.

Список литературы:

1. Steinberg V. Elastic Turbulence: An Experimental View on Inertialess Random Flow // Annual Review of Fluid Mechanics. 2021. V. 53. pp. 27–58.
2. Oldroyd J. G. On the formulation of rheological equations of state // Proc. R. Soc. Lond. Ser. A Math. Phys. Sci. 200. pp. 523–541 (1950).
3. Peterlin A. Hydrodynamics of macromolecules in a velocity field with longitudinal gradient // J. Polym. Sci. B Polym. Lett., 4: 287–291 (1966).
4. Годунов С. К., Денисенко В. В., Ключинский Д. В., Фортова С. В., Шепелев В. В. Исследование энтропийных свойств линеаризованной редакции метода Годунова // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2020. Т. 60. С. 639–651.
5. Kurganov A., Tadmor E. New High-Resolution Central Schemes for Nonlinear Conservation Laws and Convection–Diffusion Equations // J. of Computational Physics. 2000. V. 160. pp. 241–282.
6. Guzev, Mikhail A., Denisenko, Vladimir V., Ermakov, Alexey D. and Fortova, Svetlana V. Numerical investigation of turbulent flow at low Reynolds numbers for a polymer solution // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, vol. 41, no. 2, 2026, pp. 105–117.

Работа выполнена
по госзаданию ИППМ им. М.В. Келдыша

УЛУЧШЕНИЕ МЕТОДА ЛДА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ КРЕМНИЕВОГО ФЭУ И УПРОЩЕННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОТОКА ЧЕРЕЗ МНОГОФАЗНЫЙ БАРЬЕР

Зубанов К.С.^{1,2}, Кабардин И.К.^{1,2}, Меледин В.Г.^{1,2}, Двойнишников С.В.^{1,2}, Гордиенко М.Р.^{1,2}, Рахманов В.В.^{1,2}, Какаулин С.В.^{1,2}, Зуев В.О.^{1,2}, Краев И.М.³, Сергеев Д.А.³, Троицкая Ю.И.³

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

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630073, Россия

³ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603951, Россия

Изучение тепломассообмена актуально в ряде промышленных и научных приложений. Зачастую исследование теплообмена завязано на изучение гидро- и аэродинамики потоков. Для исследования гидро- и аэродинамики потоков актуально использовать оптические методы исследования, поскольку они не возмущают поток и зачастую имеют низкую погрешность измерения. Среди оптических методов известен метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА), одной из проблем использования которого является высокая стоимость анемометров на его основе. Высокую стоимость анемометра зачастую обеспечивают дорогостоящие и сложные компоненты в его оптической схеме. Поэтому одним из путей уменьшения стоимости анемометра является использование более простых схем с меньшим количеством элементов и более дешевых узлов.

С развитием современной микроэлектроники появились полупроводниковые аналоги дорогостоящих вакуумных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), которые используются при создании измерительных систем. Близким аналогом на сегодняшний день является кремниевый ФЭУ на основе кремниевых микропиксельных лавинных фотодиодов [1]. Однако их применение в качестве фотоприемников в лазерной анемометрии еще не получило широкого распространения.

Следующим дорогостоящим компонентом оптической схемы являются акустооптические модуляторы – ячейки Брэгга. Акустооптические модуляторы можно заменить светоделительным кубом, который позволяет одновременно разделять исходный луч лазера на два пучка и сводить их вместе в необходимом месте для создания измерительной области. Точка пересечения лучей может быть передвинута путем поворота светоделительного куба.

Цель работы – разработать упрощенную оптическую схему лазерного доплеровского анемометра с применением кремниевых фотоэлектронных умножителей взамен классического вакуумного ФЭУ. И опробовать ее при измерении аэродинамики водного аэрозоля через многофазный барьер на ветроволновом канале в Институте прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород.

Метод ЛДА основан на регистрации доплеровского сдвига частоты лазерного излучения, рассеянного движущимися частицами в потоке. Измерение скорости частиц осуществляется в объеме, образуемом пересечением двух лазерных пучков.

Оптическая схема прототипа лазерного доплеровского анемометра основана на светоделительной кубе. Лазерный пучок от лазерного источника ($\lambda = 633$ нм) направляется на фокусирующие линзы, которые формируют перетяжку пучка в пространстве. Разделенные пучки направляются в измерительную область. Свет, рассеянный частицами, собирается объективом и фокусируется на кремниевый лавинный фотодетектор с микропиксельной структурой.

Макет лазерного доплеровского анемометра на основе светоделительного куба и кремниевых фотоэлектронных умножителей был использован для измерения распределения скоростей капель в потоке на различных высотах в ветроволновом канале.

Измерения проводились совместно с использованием лазерного доплеровского анемометра «ЛАД-05» производства «ИОИТ», г. Новосибирск. Получены профили скорости в канале и гистограммы распределения скорости частиц в канале при фиксированной скорости потока.

В результате работ разработана более дешевая оптическая схема для лазерного доплеровского анемометра на основе светоделительного куба и кремниевых фотоэлектронных умножителей. Проведены измерения распределений скорости частиц на ветроволновом канале в Институте прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород. Приведены сравнения профилей скорости частиц, полученные при помощи двух различных оптических схем лазерных доплеровских анемометров. Результаты демонстрируют работоспособность макета доплеровского анемометра применительно к изучению тепломассообмена.

Список литературы:

1. Yu.I. Troitskaya, A. Kandaurov, O. Ermakova, D. Kozlov, D.A. Sergeev and S. Zilitinkevich, The "Bag breakup" spume droplet generation mechanism at high winds. Part I: spray generation function, *Journal of physical oceanography*, 2018, Vol. 48, No 9, P. 2168–2188.
2. Rakhmanov V. V., Kashkarova M. V., Kakaulin S. V., Zubanov K. S., Dvoynishnikov S. V. Analysis of the limits of applicability of photomultipliers as part of a laser Doppler anemometer. *Izmeritel'naya Tekhnika*, 73(6), 32–39 (2024). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-6-32-39>

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-20007, <https://rscf.ru/project/25-79-2000>.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ ЭЛЕКТРОИМПЕДАНСНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАСООБМЕНА ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ПУЛЬПЫ

Кабардин И.К., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Гордиенко М.Р., Зубанов К.С., Рахманов В.В., Лобанов П.Д., Главный В.Г., Прибатурин Н.А., Ротарь А.Д., Волков С.М., Евдокименко И.А.

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

Процессы тепломассообмена играют важную роль во многих областях науки и техники. Их изучение является обязательным этапом проектирования и эксплуатации сложных машин и аппаратов с газожидкостным теплоносителем. Для исследования этих процессов применяются многие известные бесконтактные и контактные методы, такие как визуализация, лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА), метод цифровой трассерной визуализации, томография, термометрия, электрозондирование[1].

Экспериментальное исследование гидродинамики полидисперсной пульпы актуально для задач алюминиевого производства. Натурные измерения трудоемки и дороги, поэтому, как правило, моделирование гидродинамики натуральных аппаратов выполняется методами вычислительной гидродинамики. Для корректного моделирования гидродинамики пульпы необходима настройка расчетной модели на ряде модельных экспериментов, повторяющих процессы в крупномасштабных установках. Исследование гидродинамики пульпы осложнено тем, что она представляет собой многофазную непрозрачную среду.

Цель работы - обоснование перспективности метода матричной электроимпедансной диагностики при исследованиях трехмерных одно- и двухфазных течений жидкости, разработка системы обработки сигнала, создание и изучение электроимпедансных параметров электроимпедансного датчика.

Метод пространственной кондуктометрии основан на регистрации пространственного распределения электрофизических свойств потока - удельной электрической проводимости и диэлектрической проницаемости. В качестве основного измерительного прибора в данном методе используются кондуктометрические датчики, которые могут иметь различную геометрическую конфигурацию чувствительной области.

Матричный электроимпедансный датчик представляет собой комбинацию двух наборов электродов-струн, лежащих в параллельных плоскостях, отстоящих на некотором расстоянии друг от друга. Сеточный зонд матричного датчика позволяет регистрировать пространственное распределение электрических параметров среды, таких как удельная проводимость и удельная электрическая емкость. Зонд состоит из двух групп проволочных электродов, разнесенных в пространстве и развернутых друг относительно друга. Первая группа электродов является возбудителями (генераторами опорных сигналов), а вторая группа является приемниками. Пространственное пересечение двух групп электродов образует измерительную область, состоящую из набора узлов, каждый из которых образован парой электродов генератор-

приемник. Измерение параметров происходит в области зазора между двумя электродами, один из которых используется как источник возбуждения, второй - как приемник тока. На основе измеренного тока определяется эффективный электрический импеданс среды в пространстве между электродами. Измерение электрических характеристик узла осуществляется подключением соответствующего электрода возбуждения к генератору и регистрации протекающего тока в приемном электроде. Неактивные электроды возбуждения при этом подключаются к нулевому потенциалу.

Метод исследования процессов теплопереноса с использованием полевой регистрации электроимпедансных свойств потоков основан на регистрации динамики переноса маркера. Данный метод по своей постановке подобен методам оптической визуализации гидродинамических полей потоков. В качестве маркера успешно использовался водный раствор соды NaHCO_3 .

Детальное исследование электроимпедансных параметров матричного датчика проводилось на специальном лабораторном экспериментальном стенде, состоящем из цилиндрического стакана диаметром 120 мм и высотой 70 мм. Для исследования статических характеристик матричного зонда стакан заполняется дистиллированной водой. Изготовлен матричный датчик с электродами в виде пластин из нержавеющей стали высотой 3 мм и шириной 1 мм, измерительный зазор между плоскостью возбуждения и плоскостью регистрации которого был равен 3 мм. Электроды зонда образуют 36 измерительных узлов (поле 6 на 6 с шагом 20 мм). На первом этапе были задействованы 1 возбуждающий электрод и три приемных - нулевой первый и второй. Высота шаровой засыпки из шариков диаметром 2 мм составляла 0, 20, 40 мм. Результаты выполненных экспериментальных исследований электроимпедансных характеристик матричного датчика показали, что с его помощью можно проводить исследование процессов массопереноса в однофазных средах.

Список литературы:

1. Баринов А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Главный В.Г., Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок, Приборы и методы измерений, 2016, Т. 7, № 3, С. 247–255.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00627, <https://rscf.ru/project/25-19-00627>.

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВНУТРИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК**

**Кабардин И.К., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Какаулин С.В., Рахманов В.В., Бакакин Г.В.,
Гордиенко М.Р., Зубанов К.С., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А.**

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

Многофазные потоки широко распространены в процессах в ядерных энергетических установках. Современные научно-инженерные подходы к конструированию энергетических установок опираются на численное моделирование как инструмент тестирования конструктивных гипотез. Однако, для того чтобы иметь адекватный предсказательный уровень полученной модели, математическое моделирование нуждается в точных исходных данных и экспериментальной валидации расчётов. Поэтому разработка измерительного оборудования для диагностики многофазного газожидкостного потока в гидродинамической модели энергетических установок актуально [1,2].

Фундаментальная научная проблема, на решение которой нацелена работа, связана с созданием эффективных средств измерения исследований дисперсной составляющей в экспериментах по моделированию широкого класса систем в элементах ядерных энергетических установок.

Разработана модификация метода доплеровской ультразвуковой диагностики двухфазных потоков. Модифицированный метод позволяет в автоматическом режиме измерять скорость газовой неоднородности в среде. используются ультразвуковые излучатели, способные под приложенным переменным сигналом генерировать колебания. Излучатели установлены в модель сборки атомной энергетической установки в один из стержней. Принцип работы излучателей ультразвука основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте. В основе метода измерения скорости лежит доплеровский метод. Его суть заключается в эффекте сдвига частоты ультразвукового сигнала, который рассеивается на фазовых неоднородностях, относительно значения опорной частоты. Фазовыми неоднородностями могут выступать пузырьки газа или дисперсионная фаза. Разность частот $f_1 - f_2$ зависит от скорости рассеивающей неоднородности. Опорная частота f_1 (создаваемая источником) определяется резонансной частотой ультразвукового преобразователя, используемого в эксперименте. Отраженная частота f_2 определяется частотой ультразвуковых волн, которые регистрируются преобразователем – приёмником. Далее выполняется дискретное преобразование Фурье сигнала, в результате которого получается спектр Фурье сигнала. Следующий шаг – вычисление центра масс спектра сигнала. Измерение скорости поверялось с помощью лазерного доплеровского анемометра ЛДА-07Т, разработанного и изготовленного в ИТ СО РАН. Также метод позволяет оценить газосодержание в меж стержневом пространстве, по изменению амплитуды сигнала при прохождении газовой фазы вдоль датчика.

Проведено тестирование датчика. Жидкость от входа измерительного датчика протекает в направлении выхода. В измерительном датчике расположены ультразвуковые излучатель и приемник. Сигнал с опорного генератора смесителя, подается на передатчик, проходит через среду и претерпевает множественные переотражения в измерительном объеме. В результате интерференции волн, приемник регистрирует результат интерференции волн в исследуемом измерительном объеме. Сигнал с приемника подается на смеситель. Питание смесителя обеспечивает блок питания с выходным напряжением ± 15 В. На смесителе сигнал от опорного генератора и приемника складываются и возводятся в квадрат, после чего отфильтровываются фильтром высоких частот. Низкочастотная компонента смешанного сигнала регистрируется при помощи АЦП. Данные с АЦП передаются по кабелю на персональный компьютер. В смесителе установлен фильтр высоких частот, который оставляет в сигнале только низкочастотную составляющую. Смеситель выдает два сигнала, смещенных друг относительно друга на фазу 90 градусов, каждый из них выводится на канал АЦП.

Разработан лабораторный образец программно-аппаратного комплекса, реализующий модифицированный метод. Разработан экспериментальный стенд для лабораторных испытаний комплекса. В стенде обеспечена автоматическая генерация пузырей воздуха диаметрами с помощью компрессора и системы клапанов. Проведена серия лабораторных испытаний программно-аппаратного комплекса с верификацией показаний с помощью анализа видеосъемки высокоскоростной камерой. Результаты испытаний показали, что разработанный комплекс измеряет скорость пузырей газа в жидкой среде с точностью 10 %.

Список литературы:

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 2 / СПб.: Политехника, 2004.
2. Vogt T., Andruszkiewicz A., Eckert K., Odenbach S. Eckert S., Gerbeth G. Ultrasonic flow measurements and bubble detection in gas-stirred metallic melts. 8th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (2012).

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации,
Соглашение № 075-15-2025-572.*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Квасников Л.Г., Коваленко П.В., Орлов А.Д.

Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Дуговые плазматроны постоянного тока широко применяются в плазмохимии, резке и напылении материалов. Численное моделирование таких устройств требует совместного решения уравнений электродинамики, тепломассопереноса и газовой динамики с учетом сильной нелинейной зависимости теплофизических свойств плазмы от температуры. В данной работе представлена собственная двумерная осесимметричная модель плазмотрона, разработанная на языке Python. Программный комплекс разделен на три независимых вычислительных модуля, что позволило эффективно распределить задачи и оптимизировать алгоритмы решения.

Первый модуль (Тепловая задача) отвечает за расчет температурного поля $T(r, z)$. В его основе лежит полностью консервативный метод контрольного объема (Finite Volume Method) на разнесенной (staggered) сетке. Решение уравнения энергии реализовано с использованием неявной схемы Power-Law и алгоритма Томаса (Line-by-Line TDMA) с радиальной прогонкой. Для предотвращения вычислительной неустойчивости из-за высоких градиентов температуры применена линеаризация источников члена (излучения) по методу Патанкара, что усиливает диагональное преобладание матрицы коэффициентов.

Второй модуль (Электродинамика) решает эллиптическое уравнение непрерывности тока для неоднородной среды:

$$\nabla \cdot (\sigma(T) \nabla \Phi) = 0$$

Важной особенностью модуля является отказ от сеточной зависимости электродов. Катодное и анодное пятна задаются не количеством узлов расчетной сетки, а физическими размерами (в миллиметрах). Это позволило избежать нефизичных сингулярностей плотности тока и обеспечить сходимость интегральных характеристик при измельчении сетки. На основе полученного поля напряженности вычисляются плотность тока, джоулево тепловыделение, напряжение горения дуги и термический КПД устройства, определяемый как отношение приращения потока энтальпии газа к вложенной электрической мощности.

Третий модуль (Газодинамика) базируется на алгоритме SIMPLE для расчета полей осевой и радиальной скоростей, а также поля давления. Особенностью реализации является учет переменной плотности $\rho(T)$ и вязкости $\mu(T)$, а также интеграция сил Лоренца ($F = j \times B$), которые оказывают существенное влияние на формирование течения в приосевой зоне дуги. Для ускорения вычислений ресурсоемкие операции по сборке коэффициентов и решению уравнений импульса распараллелены с использованием JIT-компилятора Numba. Модуль включает жесткий контроль баланса массы (глобальный и поясечный).

Совместное решение физических задач осуществляется с помощью итерационного алгоритма. На каждом шаге реализуется следующий вычислительный цикл: расчет электродинамики и джоулевого нагрева на основе текущего температурного поля, затем обновление температурного поля с учетом полученных источников тепла, пересчет газодинамических полей скоростей и давления.

Разработанная модель была протестирована на различных плазмообразующих средах. В частности, для аргоновой плазмы при токе 400 А получено хорошее согласование расчетной напряженности электрического поля с экспериментальными данными. Модель корректно описывает пики напряженности на электродах, вызванные эффектом геометрического сжатия линий тока в области катодного и анодного пятен. Строгий контроль массового баланса (невязка $< 0.05\%$) позволяет рассчитывать конвективный вынос энергии и термический КПД плазмотрона. Анализ зависимости КПД от энтальпии газа показал качественное соответствие расчетного тренда эталонным данным. Наблюдаемое количественное занижение результатов по сравнению с экспериментом объясняется принятыми физическими допущениями, в первую очередь отсутствием в текущей постановке задачи учета турбулентного теплообмена.

В программный комплекс интегрированы физико-химические модели эрозии электродов и кинетики химических реакций, что позволило успешно смоделировать процессы плазмохимического синтеза мелкодисперсных частиц. Учет теплот фазовых переходов, а также массообмена на границе «плазма–металл» обеспечил корректное предсказание эрозионного износа и распределения целевых продуктов реакций в выходном газовом потоке.

Разработанный программный комплекс является надежным инструментом для исследования параметров дуговых разрядов при различных расходах газа и токах.

Список литературы:

1. Дресвин С. В., Иванов Д. В. Основы математического моделирования плазмотронов. Ч. 2: Электромагнитные задачи в плазмотронной технике : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 296 с.
2. Электродуговые генераторы термической плазмы / отв. ред. М. Ф. Жуков, Н. М. Засыпкин. Новосибирск : Сиб. предприятие РАН «Наука», 1999. 464 с. (Низкотемпературная плазма ; т. 17).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2025-572)

РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БР-1200

Клементьев А.А., Сапожников И.С., Морозов А.В., Семенёв П.А., Авдеев И.В.

АО «НИКИЭТ»,

площадь Академика Доллежалея, д.1, корп. 3, Москва, 107140, Россия

В настоящее время при проектировании реакторных установок (РУ) широко применяются методы численного моделирования. Различные элементы РУ описываются с использованием разных уровней приближения; например, активная зона (АЗ) может моделироваться в приближении «пористого тела». Используемые приближения требуют обоснования, а расчётные методики — верификации и валидации.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования АЗ (с использованием модели пористого тела и потвального разрешения) РУ перспективного коммерческого энергоблока БР-1200, в котором в качестве теплоносителя предполагается использование жидкого металла — свинцового теплоносителя (СТ). Представленная расчётная методика была валидирована на результатах гидравлических испытаний тепловыделяющих сборок (ТВС).

Для обоснования теплотехнической надёжности и получения данных о течении и теплообмене в РУ БР-1200 применяются различные (одномерные и трёхмерные) методы вычислительной гидродинамики (CFD) в сочетании с экспериментальными исследованиями. Поскольку АЗ РУ БР-1200 является бесчехловой, то в ней возможны поперечные течения свинцового теплоносителя. В связи с этим для определения гидравлического сопротивления АЗ необходимо использование трёхмерного моделирования с применением современных CFD-кодов. Геометрия тракта теплоносителя через АЗ является топологически сложной, и в процессе инженерного проектирования часто происходит изменение геометрии или полная замена элементов АЗ. В связи с этим общая сеточная модель была сформирована из нескольких различных сеток, построенных с помощью разных программных средств. В некоторых подобластях решались стационарные RANS-уравнения с двухслойной $k-\varepsilon$ realizable моделью турбулентности, а в других (область твэлов в АЗ, решётки в головках ТВС и др.) использовалась модель пористого тела.

Для применения модели пористого тела необходимо определение коэффициентов проницаемости (инерционного P_i и вязкостного P_v), которые в общем случае являются ортотропными:

$$dp/dx = P_i u^2 + P_v u \quad (1)$$

где dp/dx — объёмная сила в пористом теле, Н/м³; u — скорость, м/с.

В настоящей работе коэффициенты проницаемости определяются по следующему алгоритму. Сечение ТВС разбивается на элементарные ячейки со сходной геометрией (до 11 таких элементарных ячеек для каждого типа ТВС). Каждая такая ячейка моделировалась с помощью ANSYS Fluent в периодической постановке, для неё определены интегральные характеристики: коэффициент гидравлического сопротивления и коэффициент теплоотдачи при различных числах Рейнольдса.

Полученные значения интегральных характеристик в дальнейшем использовались в качестве параметров модели тракта теплоносителя через ТВС в канальном одномерном коде «ПУЧОК-ЖМТ» [1]. Модель учитывает периодическое расположение дистанционирующих решёток (ДР). По результатам расчётов определены зависимости перепада давления (отдельно на твэльной области и области ДР) от расхода теплоносителя через ТВС каждого типа.

Полученные зависимости были преобразованы в координаты $(dp/dx, u)$ и аппроксимированы квадратичной зависимостью. Константы аппроксимации представляют собой коэффициенты проницаемости из формулы (1) для продольного направления ТВС. Для определения поперечных коэффициентов проницаемости использованы аналитические соотношения, учитывающие влияние угла натекания потока относительно оси ТВС, приведённые в справочнике [2].

С использованием описанной методики выполнено замыкание физической модели и проведено моделирование АЗ РУ БР-1200 (см. рис. 1). Определено распределение расходов теплоносителя по различным типам ТВС, а также его изменение по высоте АЗ.

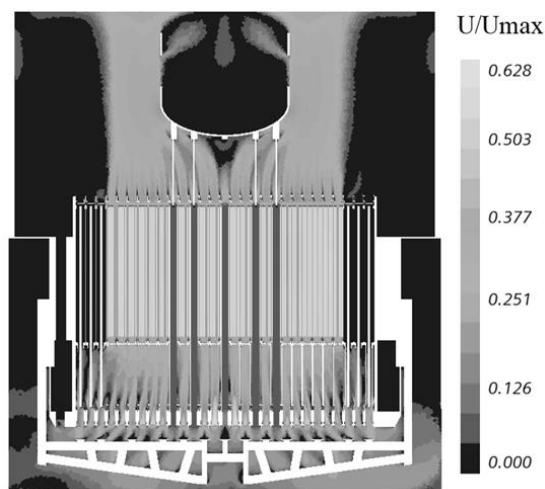


Рис. 1. Распределение скорости в сечении АЗ БР-1200

Аналогичная методика была применена для создания численных моделей экспериментальных трактов через разные типы ТВС. Получено удовлетворительное соответствие результатов моделирования с экспериментальными зависимостями перепада давления от расхода СТ.

Список литературы:

1. Экспертный совет по аттестации программных средств при Ростехнадзоре. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин «ПУЧОК-ЖМТ», № 464 от 23.07.2023 г.
2. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчётам в ядерной энергетике. Т.1. — М.: ИздАт, 2010. — 776 с.

МОДУЛЬНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ PINN

Клепцова Л.А.

АНОО ВО «Университет «Сириус»,
Олимпийский проспект, д.1, федеральная территория «Сириус», 354340, Россия

В работе рассматривается модульный подход к решению задач математической физики на основе physics-informed neural networks (PINN). Нейросетевые модели позволяют строить аппроксимацию решения без явного формирования сеточной схемы, используя данные о поведении решения и физические ограничения, задаваемые дифференциальным оператором [1]. Однако при переходе к сложным или составным областям обучение одной глобальной модели, которая обучается для конкретной геометрии, может сопровождаться ростом вычислительных затрат, ухудшением сходимости и трудностями в учёте внутренних интерфейсов [2].

Для преодоления ограничений по области предлагается модульная архитектура, в которой исходная область разбивается на несколько подобластей, а каждой подобласти соответствует собственный экземпляр одной и той же модели PINN. Это позволяет локализовать обучение и сделать процедуру аппроксимации более гибкой, что приводит к масштабируемости и универсальности для различных геометрий и границ и уменьшит вычислительные затраты, так как модульная схема позволяет переиспользовать обученные модели для различных составных областей.

Также для учета различных граничных условий рассматриваются варианты, при которых во входной вектор нейросетевой модели включаются не только координаты внутренней точки, но и дополнительные признаки, характеризующие поведение решения на границе подобласти. В частности, исследуется представление граничной информации через значения на граничных точках с указанием типа условия границы

и через разности значений в близлежащих точках границы.

Для решения задачи согласования локальных решений на внутренних границах области, предлагается процедура итерационной обработки границ. Внутренняя граница инициализируется некоторым начальным приближением, после чего граничные точки последовательно пропускаются через соседние PINN-модели. Полученные значения используются для обновления граничных условий, и процесс продолжается до выполнения критерия сходимости.

В докладе будет подробно рассказано о построении алгоритма, обучении PINN, об обработке границ и применении данного подхода и о его дальнейшем развитии. Будут представлены результаты применения подхода при решении уравнения Пуассона с различными граничными условиями.

Список литературы:

1. M. Raissi, P. Perdikaris, G.E. Karniadakis, Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics, V. 378, 2019, P. 686-707.
2. Wang S., Teng Y., Perdikaris P. Understanding and mitigating gradient flow pathologies in physics-informed neural networks // SIAM Journal on Scientific Computing. 2021. Vol. 43(5). A3055–A3081.

При финансовой поддержке, реализуемой в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение №18-03 от 10.09.2024).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДЫМЛЕНИЯ ПРИ ВОЗГОРАНИИ В БАГАЖНОМ ОТСЕКЕ САМОЛЕТА. СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ FLOWVISION И FDS.

Коротаев Р.А., Сазонова М.Л., Щеляев А.Е.

ООО "ТЕСИС", ул. Юннатов 18, Москва, 127083, Россия

Моделирование возгорания на объектах играет важную роль в прогнозировании пожарной опасности и разработке методов обеспечения эвакуации людей. Основная цель данной работы — продемонстрировать возможность решения в программном комплексе FlowVision [1] прикладных задач по моделированию задымления при возгорании на примере известного эксперимента «Aircraft cargo compartment fire detection and smoke transport modeling» [2]. Этот тест включен в валидационные материалы специализированной программы Fire Dynamic Simulator (FDS), которая разработана в Национальном Институте Стандартов и Технологий (NIST) для моделирования пожаров и широко используется для прогнозирования распространения дыма в зданиях и на открытых пространствах. Цель эксперимента - исследование нестационарного горения в багажном отделении самолета. В ходе эксперимента измерялись следующие параметры: температура (с помощью группы термодпар, расположенных под потолком), концентрации углекислого и угарного газов (на трех датчиках), светопропускание. Последний параметр является критическим при пожаре, поскольку он характеризует ослабление луча света на частицах дыма и лежит в основе работы фотоэлектрических датчиков.

В работе описывается разработанная расчётная модель задачи в FlowVision. Моделируемыми веществами являются азот и кислород как основные компоненты воздуха, вода в газообразном состоянии, топливо — $C_2H_{12.2}$, инженерное вещество, используемое для расчета вместо сложного набора реальных пластиков, а также углеродные продукты горения — смесь угарного газа, углекислого газа и сажи. Моделируемые процессы: движение (на основе уравнений Навье-Стокса с моделью турбулентности KES), массоперенос с горением, теплоперенос, излучение по модели P1. Для моделирования горения используется модель Зельдовича, которая предполагает бесконечно быструю скорость реакции и применяется для неперемешанной смеси. Это полностью подходит для моделирования пожара в багажном отсеке. В FlowVision модель Зельдовича настраивается через задание массовых стехиометрических коэффициентов, температуры воспламенения, границ содержания кислорода, при которых идет реакция. Моделирование излучения — крайне важный фактор при исследовании пожаров. Для его учета необходимо задать правильное поглощение излучения смесью веществ, которое определяется через их молярные доли и планковские средние коэффициенты поглощения [3]. В расчете используются коэффициенты для углекислого газа и водяного пара. Дым не является газом, а представляет собой облако разноразмерных частиц, однако для упрощения

был представлен как газ (аналогично FDS), и использовалась зависимость коэффициента поглощения от абсолютной температуры [4].

Результаты моделирования сравнивались по нескольким параметрам - по концентрациям углекислого и угарного газов (см. рис. 1), светопропусканию и значениям термодпар (см. рис. 2). Результаты расчетов FlowVision удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными и численными значениями FDS. По результатам сравнения сделан вывод о возможности использования программного комплекса FlowVision для моделирования прикладных задач возгорания и задымления в помещениях.

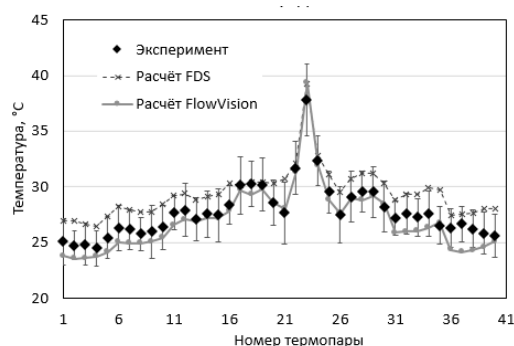


Рис. 1. Показания термодпар на 180 секунде

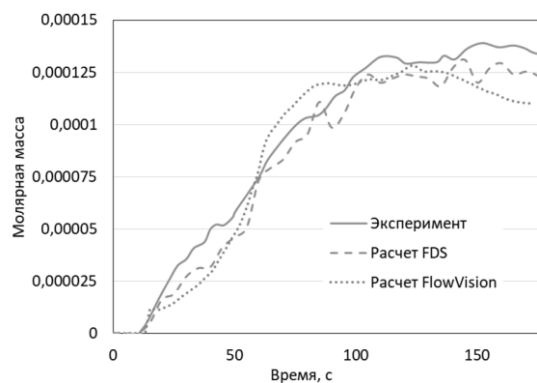


Рис. 2. Распределение угарного газа на датчике "aft" в зависимости от времени

Список литературы:

1. FlowVision Руководство пользователя. Версия 3.15.03, 2025.
2. David Blake, Jill Suo-Anttila Aircraft cargo compartment fire detection and smoke transport modeling // Fire Safety Journal, 2008. V. 43, I. 8. P. 576-582.
3. Maciej Chmielewski Planck Mean Absorption Coefficients of H₂O, CO₂, CO and NO for radiation numerical modeling in combusting flows // Journal of Power Technologies, 2015. V.95. P. 97-104
4. Hosein Sadeghi Numerical modeling of spectral radiative properties of fuel vapors in fires // Thesis submitted for examination for the degree of Licentiate of Science in Technology 2022

ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННАЯ ГРАФОВАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ОБЪЕМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Ламбин А.В.

Научно-технологический университет «Сириус»,
пр. Олимпийский 1, федеральная территория «Сириус», 354340, Россия

Введение. Традиционные подходы к машинному обучению в вычислительной теплофизике опираются на автоматическое дифференцирование [1], что обеспечивает возможность получения решения в непрерывном виде, но требует значительных вычислительных ресурсов и не гарантирует строгой дискретной консервативности. Альтернативой выступает замена автоматического дифференцирования на численные схемы, в частности на метод конечных объемов (МКО), обеспечивающий точное выполнение интегральных балансов, но только на дискретных сетках с произвольной геометрией [2]. Интеграция МКО с графовыми нейронными сетями позволяет естественным образом информировать нейронную сеть о топологии расчётной области. В настоящей работе предлагается подход к моделированию нестационарного теплопереноса на основе физически-информированной графовой сети, где пространственные производные вычисляются численно по схемам МКО, а временная эволюция описывается неявной конечно-разностной аппроксимацией.

Методика. Расчётная область дискретизируется контрольными объёмами, отображаемыми в узлы графа, а общие грани соответствуют рёбрам. Каждый узел содержит признаки: координаты центра, площади граней, расстояния до соседей и метки границ. Информация распространяется по графу посредством взвешенной агрегации признаков соседних узлов, математически аналогичной суммированию потоков на гранях контрольного объёма в МКО. Аппаратная реализация выполняется с помощью слоёв графовой свёртки с функциями активации GELU и пакетной нормализацией.

Решается уравнение нестационарной теплопроводности в безразмерной форме. Временная производная аппроксимируется неявной схемой, гарантирующей безусловную устойчивость. Пространственный лапласиан вычисляется через сумму диффузионных потоков. Градиент на внутренних гранях определяется центральной разностью, а на границах применяется линейная параметризация граничных условий, охватывающая условия Дирихле, Неймана и Робина.

Функция потерь конструируется как L2-норма дискретной невязки уравнения энергии по всем ячейкам и временным слоям.

Начальные условия удовлетворяются строго на уровне архитектуры модели, что исключает штрафные слагаемые в функции потерь и повышает устойчивость обучения. Граничные условия строго выполняются за счёт их прямого встраивания в процедуру интерполяции на грани. Обучение выполняется по

двухэтапной стратегии: оптимизатор Adam с полиномиальным убыванием скорости обучения используется для предварительной минимизации функции потерь и нахождения окрестности минимума, после чего применяется метод L-BFGS для уточнения решения в окрестности найденного минимума функции потерь.

Результаты и обсуждение. Валидация проведена на квадратной области с различными типами граничных условий и сетками, включая неортогональные разбиения. В случае условий Дирихле на левой границе и нулевых значений на остальных, начальное поле эволюционирует монотонно, без нефизичных осцилляций, демонстрируя корректное распространение теплового фронта вглубь области. При задании на части границ условий Неймана модель сохраняет консервативность: суммарный поток через границу контрольного объёма строго сбалансирован, а градиенты температуры на изолированных участках остаются близкими к нулю. Функция потерь достигает заданного порога сходимости, подтверждая выполнение дискретного баланса энергии. Предсказанные поля температуры согласуются с асимптотическими оценками теории теплопроводности.

Заключение. Предложен подход к решению нестационарных задач теплопроводности с использованием физически-информированной графовой нейронной сети, в которой пространственные производные вычисляются численно по схемам МКО. Метод строго сохраняет интегральные балансы, жёстко выполняет начальные и граничные условия, не требует заранее полученного решения для обучения с учителем и демонстрирует высокую точность на различных типах сеток.

Список литературы:

1. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // J. Comput. Phys. 2019. Vol. 378. P. 686–707.
2. Zhang H., Xia X., Wu Z., Li X. Physics-informed graph neural network based on the finite volume method for steady incompressible laminar convective heat transfer // Physics of Fluids. 2025. Vol. 37. 013625.

Результаты получены при финансовой поддержке, реализуемой в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение №18-03 от 10.09.2024).

СОПРЯЖЁННАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И КИНЕТИКИ ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ ПРИ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ОСАЖДЕНИИ КРЕМНЕЗЁМА В МИКРОФИЛЬТРАЦИОННЫХ КАНАЛАХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОРИСТЫХ СРЕД

Мещеряков А.А., Шабиев Ф.К.

Тюменский государственный университет,
ул. Перекопская 15А, Тюмень, 625000, Россия

Моделирование процессов в микрофилтративных каналах, получаемых фотополимерной 3D-печатью с характерным диаметром 100–500 мкм [1], требует учёта взаимосвязанных явлений течения реагирующего золя, сопряжённого тепломассопереноса и кинетики золь-гель перехода. Формирование тонкого слоя SiO₂ на стенках каналов при прокачке золя на основе тетраэтоксисилана придаёт поверхности гидрофильность и химическую инертность, однако управление толщиной и однородностью слоя требует количественного описания связанного процесса. Цель работы — постановка сопряжённой динамической задачи, описывающей пространственно-временное распределение толщины осаждаемого кремнезёма в канале радиуса R и длины L.

Постановка задачи. В осесимметричной цилиндрической системе координат рассматривается нестационарное ламинарное течение несжимаемого золя с переменной вязкостью $\eta(\alpha)$. Разрешающая система уравнений включает уравнения неразрывности (1), движения в приближении Буссинеска (2), энергии с объёмным источником за счёт экзотермической поликонденсации (3), конвективно-диффузионного переноса мономера и воды (4-5), кинетическое замыкание (6-7) и уравнения эволюции степени конверсии и поверхностной плотности привитого кремнезёма (8-10):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{u} - \rho_0 \beta (T - T_0) \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \lambda \nabla^2 T + (-\Delta H) W \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c = D \nabla^2 c - W \quad (4)$$

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c_w = D_w \nabla^2 c_w + 2W \quad (5)$$

$$W = A \cdot \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \cdot c \cdot \left(1 - \frac{c_w}{c_{w,ref}} \right) \quad (6)$$

$$\eta(\alpha) = \eta_0 \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_{gel}} \right)^{-n} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha = \frac{W}{c_0} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = k_s \cdot c \left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_{max}} \right) \quad (9)$$

$$\delta = \frac{\Gamma M_{SiO_2}}{\rho_{SiO_2}} \quad (10)$$

Начальные и граничные условия. На оси канала ($r = 0$) — условия симметрии. На стенке ($r = R$) выполнены прилипание $u = 0$, $T = T_{wall}$ и смешанное условие по концентрации мономера: $-D \frac{\partial c}{\partial r} = k_s \cdot c (1 - \Gamma/\Gamma_{max})$. На входе ($z = 0$): $u_z = Q / \pi R^2$, $T = T_{in}$, $c = c_0$, $c_w = c_{w,0}$, $\alpha = \alpha_0$; на выходе ($z = L$) — нулевые осевые градиенты всех скалярных полей. Начальные условия при $t = 0$: поля покоя, $T = T_0$, однородные c_0 и $c_{w,0}$; $\alpha_0 \in [0,05; 0,15]$; $\Gamma = 0$.

Определение параметров. Расчётные (по правилам смесей для системы вода-этанол-Si(OH)₄): плотность ρ , теплоёмкость c_p , теплопроводность λ , коэффициент термического расширения β — средневзвешенные по массовым/мольным долям; коэффициенты диффузии D и D_w — по уравнению Стокса-Эйнштейна $D = k_B T / (6\pi \eta r_h)$; начальные концентрации c_0 и $c_{w,0}$ — из стехиометрии синтеза. Экспериментальные (для конкретной партии золя): начальная вязкость η_0 (ротационный вискозиметр), начальная конверсия α_0 (ДПС и ДСК свежего золя), конверсия в гель-точке α_{gel} (реометр по критерию $G' = G''$). Литературные: $E_a \approx 48$ кДж/моль, $\Delta H \approx -22$ кДж/моль [1, 2]; предэкспонент $A \approx 5 \cdot 10^5$ м³/(моль·с) — начальное приближение с уточнением по наклону $\ln k - 1/T$. Идентифицируемый по эксперименту: константа поверхностной адсорбции $k_s \in [10^{-8}; 10^{-6}]$ м/с — подгоняется по измеренной профилограмме $\delta(z)$ в пост-эксперименте.

Численная реализация. Задача решается в COMSOL Multiphysics в осесимметричной 2D-постановке связкой модулей Laminar Flow, Heat Transfer in Fluids, Transport of Diluted Species (для c и c_w), General Form PDE (для α) и Coefficient Form Boundary PDE (для Γ) с нелинейной зависимостью $\eta(\alpha)$ в определении жидкости. При $\delta \gtrsim 0,05R$ подключается модуль ALE Moving Mesh для учёта сужения канала. Целевой результат — поле $\delta(z, \tau)$ для разных режимов прокачки $\{Q, T_{wall}, c_0, \tau\}$, используемое как критерий выбора режима модифицирования каналов.

Список литературы:

1. Мещеряков А. А., Шабиев Ф. К. 2025. Применение аддитивных технологий для воспроизведения физической структуры ядра и валидации численных расчетов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 11. № 2 (42). С. 71–91.
2. Brinker C.J., Scherer G.W. Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. San Diego: Academic Press, 1990. 908 p.
3. Iler R.K. The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry. New York: Wiley, 1979. 866 p.
4. Perry's Chemical Engineers' Handbook / Ed. by D.W. Green, M.Z. Southard. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2019. 2272 p.

NOVEL ADAPTIVE SCHEMES FOR HYPERBOLIC CONSERVATION LAWS

Chu S.¹, Feng P.², Khandeeva N. A.^{3,4}, Kolotilov V. A.^{3,4}, Kurganov A.⁵, Ostapenko V. V.^{3,4}¹ Department of Mathematics, RWTH Aachen University, 52056 Aachen, Germany² Department of Mathematics, North Carolina State University, 27695 Raleigh, USA³ Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Russia⁴ Keldysh Institute of Applied Mathematics, KIAM, 125047, Moscow, Russia⁵ Department of Mathematics and Shenzhen International Center for Mathematics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, 518055, China

We have introduced [1] novel adaptive schemes for hyperbolic systems of conservation laws. The new schemes are based on a scheme adaption strategy introduced in [2]. Like any adaptive scheme, the proposed one utilizes a Smoothness Indicator (SI) [3] to automatically detect «rough» and smooth parts of the computed solution at each time-step. We then use the same SI to identify vicinities of contact discontinuities within the detected «rough» areas. In the case of Euler equations of gas dynamics, this is achieved by applying the SI to the density field, which is discontinuous at contact waves, and to the pressure, which is continuous there.

After splitting the computational domain into the corresponding three areas – «contact», «rough», and «smooth» – we apply different schemes inside each of them. In the «contact» areas, we use the Low-Dissipation Central Upwind (LDCU) scheme [2] with the overcompressive limiter [4], which helps to extremely sharply resolve contact discontinuities. In the rest of the «rough» areas, we use the LDCU scheme with the dissipative Minmod2 limiter [4], which helps to both capture shock waves in a non-oscillatory manner and prevent appearance of artificial staircase-like structures, which may be developed when the overcompressive limiter is used. Finally, in the «smooth» area, we use a very simple Quasi-Linear (QL) fifth-order finite-difference scheme [5], which helps to extremely accurately capture smooth parts of the computed solution.

The new adaptive schemes have been tested on a number of one- and two-dimensional numerical examples, which clearly demonstrate the ability of the proposed schemes to achieve very high resolution, while being robust. We also show that the new schemes clearly outperform the adaptive schemes from [2], while being substantially more efficient thanks to a very low computational cost of the quasi-linear fifth order schemes.

The main goal of paper [6] was to further increase the resolution of the smooth parts of the computed solution. To this end, we replace the QL fifth-order schemes, which were used in [1], with the developed in [7] QL seventh- and ninth-order schemes from, and incorporate them into the same adaptive strategy. The new QL higher-order schemes rely on a high-order artificial-viscosity

term whose strength is controlled by parameters that can be selected to optimize their linear stability properties.

To determine the optimal values of those parameters, we conduct a von Neumann stability analysis for the 1-D QL seventh- and ninth-order schemes. In the 2-D extension, we follow a dimension by dimension construction and retain the same stability-motivated viscosity parameters. The resulting adaptive schemes preserve the robustness and sharp resolution of the discontinuities, while providing a higher-fidelity representation of smooth structures. The improvements are illustrated on a series of 1-D and 2-D benchmarks for the Euler equations of gas dynamics, where the seventh- and ninth-order schemes are compared against the fifth-order one within the same adaptive framework.

References:

1. A., Ostapenko V. V. Novel adaptive schemes for hyperbolic conservation laws // Commun. Comput. Phys. Accepted.
2. Chu S, Kurganov A., Menshov I. New adaptive low-dissipation central-upwind schemes // Appl. Numer. Math., 209 (2025), pp. 155–170.
3. Lohner R. An adaptive finite element scheme for transient problems in CFD // Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 61 (1987), pp. 323–338.
4. Lie K.-A., Noelle S. On the artificial compression method for second-order nonoscillatory central difference schemes for systems of conservation laws // SIAM J. Sci. Comput., 24 (2003), pp. 1157–1174.
5. Kolotilov V. A., Ostapenko V. V., Khandeeva N. A. Fifth-order finite-difference scheme in space with increased accuracy in shock influence areas // Comput. Math. Math. Phys., 65 (2025), pp. 901–916.
6. Chu S., Feng P., Kolotilov V. A., Kurganov A., Ostapenko V. V. Novel Adaptive Methods for Hyperbolic Conservation Laws Based on New Quasi-Linear Seventh- and Ninth-Order Schemes // Commun. Comput. Phys. Submitted
7. Kolotilov V. A., Ostapenko V. V., Khandeeva N. A., Finite-difference schemes of odd order in space with increased accuracy in the areas of shock waves influence // Dokl. Math. Accepted.

*The work was supported by RSF
(grant № 26-11-00230).*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ И ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ТУРБИНАХ ВЫСОКОНАПОРНЫХ ГЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

Платонов Д.В.^{1,2}, Минаков А.В.¹, Лобасов А.С.^{1,2}, Сентябов А.В.²

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

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

Проблема пульсаций давления в проточном тракте высоконапорных ГЭС известна достаточно давно. Скачки давления в проточном тракте гидротурбины, особенно в переходных и нештатных режимах работы могут привести к выходу из строя оборудования и серьёзным аварийным ситуациям. При проектировании вновь строящихся ГЭС необходимо всё это учитывать.

Существующие подходы на сегодняшний день — это либо дорогостоящие эксперименты на крупномасштабных модельных стендах, таких стендов в России насчитываются единицы, либо детальное вихреразрывающее численное моделирование, которое требует очень большого времени счёта и больших вычислительных мощностей, а результаты нуждаются в верификации либо на данных эксперимента, либо на натурных испытаниях.

Между тем существует существенный прогресс RANS-моделей закрученных турбулентных течений, которые надёжно предсказывают осредненные профили скорости, но неспособны воспроизводить с приемлемой точностью вихревые структуры и связанные с ними пульсации давления в проточном тракте высоконапорных ГЭС [1-2].

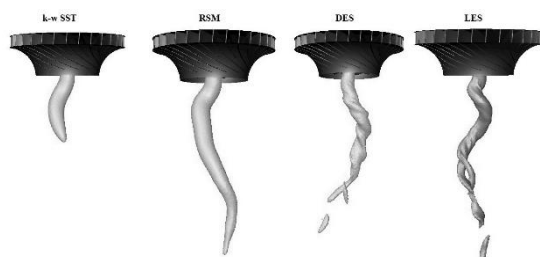


Рисунок 1. Вихревая структура за рабочим колесом гидротурбины [2]

Таким образом, становится очевидным, что исследование динамики нестационарных вихревых структур в турбулентных течениях, возникающих в элементах гидротурбин, является комплексной фундаментальной задачей, требующей серьезного экспериментального и расчетного исследования.

В настоящее время во многих промышленных задачах и приложениях применяются подходы, связанные с использованием машинного обучения и искусственного интеллекта для управления сложными технологическими процессами [3-7].

Одной из проблем при таких подходах является источник достоверной информации очень большого объёма, который требуется для обучения нейросетей, для её корректной работы.

Используя результаты численного моделирования и экспериментов на модельных стендах, можно получить достаточный объём достоверных результатов, который в дальнейшем можно использовать для обучения искусственного интеллекта. Использование нейросетей в данной ситуации позволит в десятки раз сократить время, затраченное на анализ работы и предсказание нештатной ситуации при эксплуатации высоконапорных ГЭС.

В данной работе планируется провести тестирование выбранных нейросетевых моделей на основе больших массивов данных, полученных в результате численного моделирования. Продемонстрировать возможности RANS-моделей описывать сложное течение в высоконапорных ГЭС при помощи нейросетевых моделей.

Список литературы:

1. D.V. Platonov, A.V. Minakov, A.V. Sentyabov, A.A. Dekterev, A.A. Gavrilov, Numerical modeling of flow in the Francis-99 turbine with Reynolds stress model and detached eddy simulation method, Journal of Physics: Conference Series Volume 579, 2015. p.15
2. D. Platonov, A. Minakov, D. Dekterev, A. Sentyabov, A. Dekterev, Numerical and experimental study of low-frequency pressure pulsations in hydraulic units with Francis turbine, Journal of Physics: Conference Series, Volume 754, 2016
3. Zhang, Y., et al. (2020). LSTM-based solar power forecasting using weather data. Renewable Energy.
4. Li, P., et al. (2021). Reinforcement learning for microgrid energy management. IEEE Transactions on Smart Grid.
5. Wang, H., et al. (2020). Deep learning for fault diagnosis in power transformers. Engineering Applications of AI.
6. Chen, L., et al. (2022). AI-driven HVAC optimization in smart buildings. Energy and Buildings.
7. Liu, Y., et al. (2021). GAN-based detection of false data injection attacks. IEEE Access.

Работа поддержана РНФ
(грант № 26-19-20053).

<https://rscf.ru/project/26-19-20053/>
за счет целевого финансирования (гранта)
Красноярского краевого фонда науки

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В 7-МИ СТЕРЖНЕВОЙ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ТВС

Волков С.М., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Светоносков А. И.,
Евдокименко И. А., Филиппский К. А.

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

Исследования структуры течения в ТВС реакторных установок с водяным теплоносителем проводятся в течение многих лет. Так, в конце прошлого столетия основное внимание было уделено определению интегральных гидродинамических параметров таких как коэффициент гидравлического сопротивления, осредненные скорость жидкости и напряжение трения на стенке, коэффициент теплообмена. Применялись контактные измерительные методы: отборы давления, трубки Пито и Престона, термодпарные измерения.

Для оптимизации работы РУ важную роль играет проведение измерений локальных параметров течения таких как скорость теплоносителя в каналах ТВС, азимутальной неравномерности распределения гидродинамических параметров потока в межствольном пространстве. Наличие дистанционирующих решеток (ДР) в ТВС приводит к возникновению возмущения течения теплоносителя, что в свою очередь сказывается на распределении скорости теплоносителя и, соответственно, интенсивности теплообмена. Необходимо выполнять измерения с высоким временным разрешением таких параметров как компоненты вектора скорости течения жидкости, пульсационные значения скоростей, характеристик турбулентности, спектральных характеристик. Использование современных методов измерений на основе лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА), цифровой трассерной визуализации (PIV) позволяет это делать.

Целью данной работы является экспериментальное исследование с использованием методов ЛДА и PIV локальных гидродинамических характеристик течения жидкости в межствольных каналах 7-ми стержневой гексагональной ТВС с ДР, а именно продольной и поперечной скорости водяного теплоносителя и их пульсаций.

Схема выполнения измерений показана на рисунке 1. Установка представляет собой замкнутый гидродинамический контур с установленной моделью ТВС. Диаметр стержней - имитаторов твэла D был равен 9 мм, относительный шаг между стержнями составлял 1,4. Центральная часть модели ТВС выполнена из оргстекла, с целью обеспечить доступ к измерительной оптике. Для обеспечения равномерности потока на входе в модельную ТВС устанавливались выравнивающие поток решетки. Расход теплоносителя через модель ТВС регулировался при помощи частотного преобразователя насоса, контроль расхода осуществлялся при помощи расходомера (MULTICAL® 402). В ходе эксперимента температура водяного теплоносителя составляла $T=25\pm 1^\circ\text{C}$. Эксперименты были выполнены при значениях чисел Рейнольдса $Re = 500, 2500, 5000$, соответствующих ламинарному, переходному и турбулентному режимам течения жидкости в каналах ТВС.

Схема измерений также представлена на рисунке 1, красным цветом выделена линия, вдоль которой проводились измерения скоростей с шагом 0,5 мм.

В результате измерений получены фронтальные поля скорости течения жидкости в межствольном пространстве. Установлено, что результаты измерений осевой скорости и ее пульсаций с использованием методов ЛДА и PIV хорошо совпадают между собой. Для гексагональной упаковки твэлов в ТВС впервые была измерена поперечная компонента скорости в межствольном промежутке и ее изменение в зависимости от расстояния после ДР. Показано, что уже на расстоянии 5 мм от ДР эта компонента скорости составляет 1-2 % от среднерасходной скорости.

Установлено, что при обтекании потоком жидкости ДР за ней возникают существенно пульсации осевой скорости в зависимости от азимутального угла вокруг стержня. Из-за смыкания сот ДР, вокруг твэлов создается три «открытых» и три «закрытых» ячейки. Это сказывается на гидродинамической структуре течения. В центральной области «открытой» ячейки относительная скорость течения жидкости выше, чем для «закрытой». Поток жидкости за ДР перестраивается так, что возникает локальная область струйного течения с повышенной скоростью жидкости, которая распространяется на расстояние $4\div 7 D$ вниз по течению. Максимальное и минимальное значения осевой скорости в этой области отклоняются от среднего более чем на 20%.

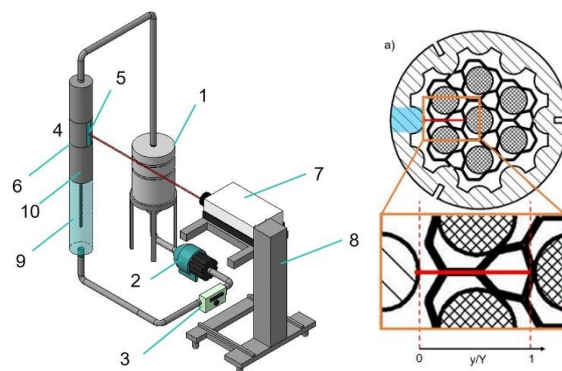


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки и измерений: 1 – бак, 2 – насос, 3 – расходомер, 4 – модель ТВС, 5 – оптическое окно, 6 – ДР, 7 – ЛДИС (PIV), 8 – координатное устройство, 9 – входной участок, 10 – сборка стержней

Исследование выполнено при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации,
Соглашение № 075-15-2025-572.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПУЗЫРЕЙ В ПОТОКЕ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Волков С.М., Гуляев Н.А., Евдокименко И.А., Легостаев Д.Е.,
Филиппский К.А., Светоносов А.И., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А.

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

Исследование гидродинамики пузырьковых потоков сохраняет высокую востребованность ввиду широкого спектра их практического применения. В промышленных технологиях пузырьковые реакторы находят массовое применение, чему во многом способствует интенсификация тепло- и массообмена. Численное моделирование подобных систем имеет значительные вычислительные трудности, обусловленные полимасштабностью явления - от эволюции единичного пузырька до турбулентности развитого двухфазного потока, что производит необходимость постоянной разработки и верификации новых математических моделей.

Фундаментальное понимание механизмов кинематики всплывающих пузырей и межфазного взаимодействия приводит к совершенствованию экспериментальных методик изучения как изолированных газовых включений, так и их ансамблей [1].

Проблема создания и оптимизации алгоритмов компьютерного зрения для трекинга пузырей и оценки влияния геометрических параметров оборудования на структуру двухфазного течения не утратила своего значения. Решение поставленной проблемы обеспечит фундаментальное понимание тепло- и массообменных процессов и может послужить основой для проектирования более производительных инженерных систем.

Целью данной работы является количественный анализ динамических характеристик газовых пузырей при их движении в вертикальном канале посредством методов цифровой обработки теневых изображений.

Для достижения поставленной цели в работе было необходимо проведен анализ различных схем получения и методов обработки теневых изображений.

Реализована программная обработка данных на базе выбранной схемы.

Выполнены систематизация, анализ и графическое представление полученных данных.

Экспериментальный комплекс включает в себя рабочий участок с вертикальной стеклянной колонной (внутренний диаметр 20 мм, наружный – 23.5 мм), высокоскоростную регистрирующую камеру и специализированную зеркальную оптическую систему, позволяющую получать на выходе изображение с двух ракурсов.

Конструкция зеркального блока обеспечивает формирование двух ортогональных теневых проекций, расположенных под углом 90 градусов, которые одновременно фокусируются на матрице камеры в пределах одного кадра.

Для извлечения количественной информации из полученного видеопотока был разработан оригинальный программный комплекс. Алгоритм работы программы базируется на процедурах бинаризации и морфологической фильтрации изображений, что позволяет реконструировать трёхмерные проекции газовых включений и восстанавливать пространственные траектории их движения (см. рисунок 1).

В ходе исследования успешно апробирована предложенная оптическая система регистрации параметров восходящего пузырькового течения. Применение разработанного программного обеспечения обеспечило получение данных о размерных, скоростных характеристиках и траекториях движения пузырей, а также позволило детально исследовать особенности их гидродинамического взаимодействия со стенками канала.

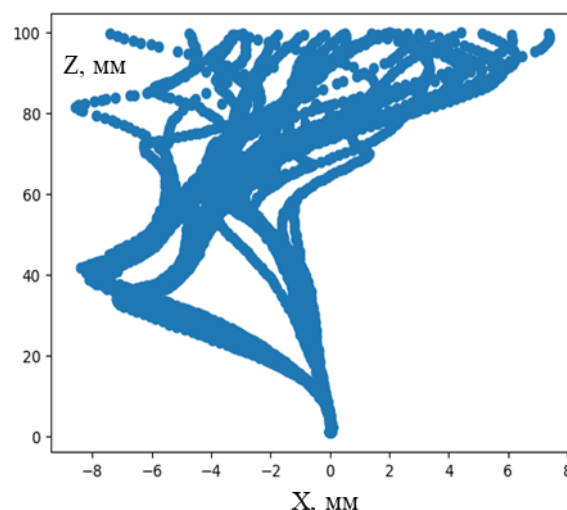


Рис. 1. Траектории движения пузырей

Список литературы:

1. I. Chan, K. Müller, P. Kovats, L. Guo, K. Zähringer. Hydrodynamics and shape reconstruction of single rising air bubbles in water using high-speed tomographic particle tracking velocimetry and 3D geometric reconstruction. Experiments in fluids, 2024, 65 p.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации,
Соглашение № 075-15-2025-572.*

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМАТИКИ И ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АППРОКСИМАТОРОВ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Ртищева А.С.

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Проектирование высокоскоростных летательных аппаратов требует точного прогнозирования аэродинамического нагрева. На сверхзвуковых режимах полета поверхность аппарата подвергается значительным тепловым нагрузкам. Пиковые значения плотности теплового потока q_w наблюдаются не только в передней критической точке, но и в области ламинарно-турбулентного перехода, где структура пограничного слоя резко перестраивается [1].

Традиционные методы вычислительной аэродинамики (CFD) требуют значительных вычислительных затрат. Альтернативой является применение методов машинного обучения [2, 3]. Нейронные сети успешно используются в задачах аэродинамического проектирования, однако их способность корректно аппроксимировать тепловые характеристики, особенно в зоне перехода, изучена недостаточно. Настоящая работа направлена на восполнение этого пробела.

Объект исследования и база данных. Объектом исследования выбран затупленный конус – базовая аэродинамическая форма носовой части высокоскоростных летательных аппаратов, характеризующаяся высотой h (расстоянием от основания до воображаемой вершины), углом полураствора θ и радиусом затупления R . Параметры набегающего потока – давление p_∞ , температура T_∞ и число Маха M .

База данных сформирована на основе параметрического CFD-моделирования с решением полной системы уравнений RANS и использованием моделей турбулентности Transition SST и SST k- ω . Расчетная сетка построена с пристеночным слоем, обеспечивающим значение $y^+ \approx 1$ для корректного воспроизведения профиля скорости и температуры в вязком подслое.

На рис. 1 представлено распределение плотности теплового потока q_w вдоль образующей затупленного конуса ($R = 0.01$ м, $\theta = 1^\circ$, $h = 10.563$ м) при $M = 1.5$ на угле атаки $\alpha = 0^\circ$ для различных высот полета H .

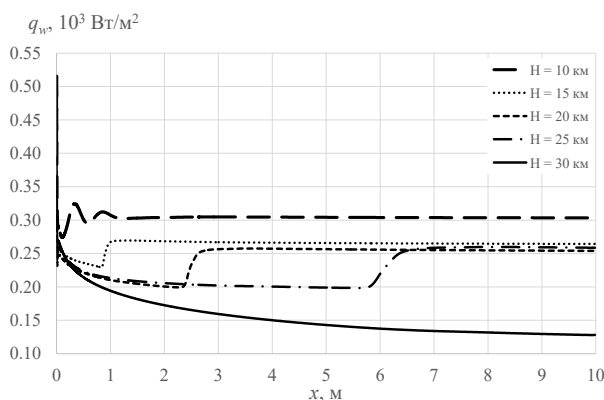


Рис. 1. Зависимость q_w от координаты x вдоль образующей затупленного конуса ($R = 0.01$ м, $\theta = 1^\circ$, $h = 10.563$ м) при $M = 1.5$ и $\alpha = 0^\circ$

Максимум q_w достигается в передней критической точке. На части рассмотренных режимов наблюдается зона ламинарно-турбулентного перехода, где q_w резко возрастает до значений, сопоставимых с критическими. Этот эффект подтверждает необходимость использования нейросетевых аппроксиматоров, способных воспроизводить немонокотонные зависимости.

Метод аппроксимации. Для аппроксимации тепловых характеристик выбрана архитектура многослойного перцептрона (MLP).

Выбор обоснован теоремой об универсальной аппроксимации [4], согласно которой сеть с одним скрытым слоем и нелинейной функцией активации способна аппроксимировать любую непрерывную функцию многих переменных с любой наперед заданной точностью. Это свойство критически важно для воспроизведения сложных нелинейных зависимостей, возникающих в зоне ламинарно-турбулентного перехода.

Планируется исследовать несколько архитектур MLP с варьированием глубины (2–5 скрытых слоев) и ширины (32–256 нейронов в слое). В качестве функций активации будут рассмотрены ReLU и его модификации (Leaky ReLU, ELU), позволяющие избежать проблемы исчезающего градиента при обучении глубоких сетей. Для предотвращения переобучения применяются методы регуляризации (Dropout, Early Stopping). Обучение реализуется с использованием библиотеки PyTorch. Выходными параметрами модели являются распределения плотности теплового потока q_w , коэффициента теплоотдачи α_w и температуры поверхности T_w вдоль образующей конуса.

Гипотеза и дальнейшие исследования. В работе проверяется, способны ли MLP-суррогатные модели воспроизводить распределение q_w с погрешностью $\leq 10\%$ (MAE/RMSE), а также будет ли максимальная ошибка систематически локализована в области ламинарно-турбулентного перехода. Дальнейшие исследования направлены на обучение MLP-моделей, анализ погрешностей и сравнение с результатами прямого CFD-моделирования.

Список литературы:

1. Александрова Е.А., Новиков А.В., Утюжников С.В., Федоров А.В. Экспериментальное исследование ламинарно-турбулентного перехода на затупленном конусе // Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т. 55, № 3. С. 5–16.
2. Dai G., Zhao W., Yao S., Chen W. Machine Learning Strategy for Wall Heat Flux Prediction in Aerodynamic Heating // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2023. V. 37, № 4. P. 721–734.
3. Sivri S. Prediction of Aerodynamic Heating on High-Speed Missiles Using Gaussian Process Based Surrogate Models: M.S. Thesis. Ankara: Middle East Technical University, 2025. 132 p.
4. Cybenko G. Approximation by superposition of a sigmoidal function // Mathematics of Control, Signals, and Systems. 1989. V. 2, № 3. P. 183–191.

РАСЧЁТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СМЕШЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА ПРИ ЕГО ПОДАЧЕ ЧЕРЕЗ ФОРСУНКИ ИНЖЕКТОРА СО СКОШЕННЫМ ТОРЦЕМ

Прохоров А.Н., Александров В.Ю., Серебряков Д.И., Мамышев Д.Л., Павлов Д.А.

ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»,
111116, ул. Авиамоторная, д. 2, Москва, Россия

В работе представлены результаты расчётных исследований по влиянию угла скоса торцев форсунок инжектора на распыл и горение водорода при его спутной подаче. Расчётные исследования проводятся численно в стационарной постановке.

Рассматривается модельный канал, в который поступает воздушный поток. Спутно воздушному потоку через струйные форсунки инжектора подаётся водород (рис. 1). На выходе из инжектора торцы форсунок выполнены со скосом, вследствие чего реализуется более интенсивный распыл водорода (рис. 2) по сравнению со случаем без скоса, что в свою очередь интенсифицирует его смешение и горение.

Во всех расчётных случаях параметры воздушного потока не меняются, а расход водорода варьируется посредством изменения его давления подачи. Таким образом, был рассмотрен диапазон коэффициента избытка окислителя в модельном канале α от 1,6 до 5,3. В ходе проведения расчётных исследований также менялся угол скоса.

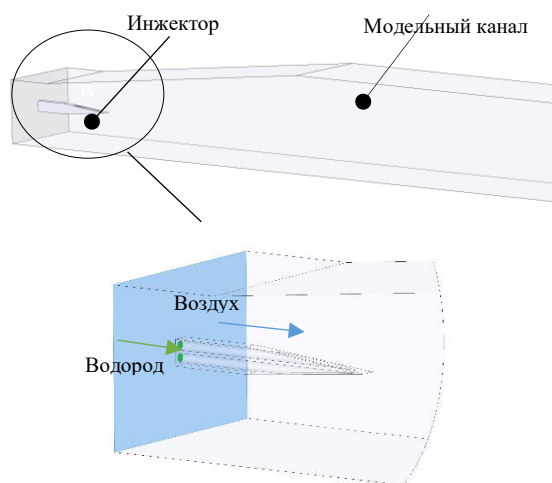


Рис. 1. Расчётная область вблизи инжектора

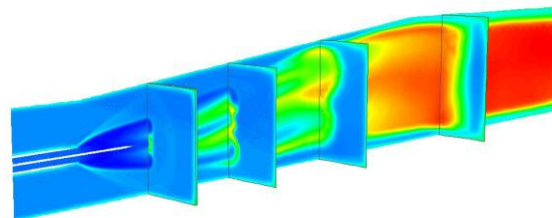


Рис. 2. Течение в области инжектора (характерное распределение поля температур)

Было получено, что с увеличением угла скоса растёт угол отклонения водородной струи от горизонтальной оси и становится шире толщина слоя смешения набегающего потока и инжектируемой водородной струи. Указанные факторы способствовали повышению полноты сгорания в модельном канале которая оценивалась по расходу не сгоревшего водорода.

При выборе параметров математической модели для проведения расчётных исследований использовались результаты работы [1].

Список литературы

1. Запрыгаев В.И., Кавун И.Н., Кундасев С.Г. Расчётно-экспериментальное исследование сверхзвуковой неизобарической струи, истекающей из сопла с косым срезом. Вестник НГУ. 2014. Т IX, №2, 75- 83 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ГИДРАТНОЙ ОБОЛОЧКИ ВОКРУГ ПУЗЫРЬКА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Сластная Д.А., Вожаков И.С., Мелешкин А.В.

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

Газовые гидраты диоксида углерода представляют значительный интерес для технологий улавливания, хранения и долговременной секвестрации углекислого газа [1]. При контакте пузырька CO_2 с переохлаждённой водной средой на межфазной поверхности формируется тонкая гидратная оболочка, которая существенно изменяет условия массопереноса между газовой и жидкой фазами. Рост такой оболочки определяется диффузией растворённого CO_2 из окружающей жидкости, переносом воды через уже сформированный гидратный слой, расходом газа внутри пузырька, а также тепловыделением при экзотермическом процессе гидратообразования. Поэтому для корректного описания динамики оболочки необходимо одновременно учитывать изменение её геометрии, диффузионное сопротивление, расход газа и тепловой баланс.

В настоящей работе выполнено численное моделирование роста сферической гидратной оболочки вокруг пузырька диоксида углерода в водной среде. Рассматривается пузырёк с внутренним радиусом $R_i(t)$, окружённый гидратной оболочкой с внешним радиусом $R_o(t)$. Толщина оболочки определяется как $\delta_i(t) = R_o(t) - R_i(t)$. Модель построена на основе балансов массы и энергии, закона Фика и приближений для диффузионного роста сферической межфазной границы. Для описания подвода растворённого газа к поверхности оболочки используется подход, восходящий к модели Epstein–Plesset для диффузионного роста и растворения пузырьков в жидкостях [2].

В отличие от более простых постановок, в модели учитывается одновременное движение внешней и внутренней границ оболочки. Внешняя поверхность растёт за счёт поступления CO_2 из окружающей жидкости. Внутренняя граница смещается вследствие образования гидрата на стороне газовой полости, что сопровождается уменьшением массы CO_2 внутри пузырька. По мере утолщения оболочки гидратный слой становится дополнительным диффузионным барьером, поэтому скорость роста постепенно снижается. Такой характер процесса соответствует современным представлениям о формировании гидратных оболочек на поверхности газовых пузырьков [3].

Отдельно учитывается тепловой эффект гидратообразования. Поскольку образование гидрата сопровождается выделением тепла, температура поверхности оболочки может отличаться от температуры окружающей жидкости. Локальный саморазогрев уменьшает термодинамический стимул дальнейшего роста, а теплоотвод в жидкость приводит к последующей

стабилизации температуры. Таким образом, массоперенос и тепловое состояние оболочки оказываются взаимосвязанными и должны рассчитываться совместно.

Полная система обыкновенных дифференциальных уравнений описывает изменение внешнего радиуса, внутреннего радиуса, температуры поверхности и массы CO_2 внутри пузырька. Численное решение выполнено методом Рунге–Кутты четвёртого порядка. Расчёты показывают, что на начальной стадии толщина гидратной оболочки быстро возрастает, после чего рост замедляется из-за увеличения диффузионного сопротивления. Внутренний рост также становится менее интенсивным по мере расхода CO_2 и увеличения толщины гидратного слоя. Температура поверхности сначала кратковременно повышается вследствие тепловыделения, а затем стабилизируется за счёт теплоотвода в окружающую среду.

Полученные результаты демонстрируют физически согласованную картину процесса: нелинейный рост толщины оболочки, переход от начального быстрого режима к более медленной стадии, уменьшение газовой полости и влияние саморазогрева на скорость роста. Предложенная модель может быть использована для оценки времени инкапсуляции отдельных пузырьков CO_2 гидратной оболочкой, анализа локального массопереноса на межфазной поверхности газ–жидкость и выбора параметров процессов получения газовых гидратов. Дальнейшее развитие модели может быть связано с учётом конвективного переноса в жидкости, полидисперсности пузырьков, изменения давления внутри газовой полости и неоднородной структуры гидратного слоя.

Список литературы:

1. Sloan Jr E. D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates //Nature. – 2003. – Т. 426. – №. 6964. – С. 353-359.
2. Epstein P. S., Plesset M. S. On the stability of gas bubbles in liquid-gas solutions //Journal of Chemical physics. – 1950. – Т. 18. – №. 11. – С. 1505-1509.
3. Sun X. et al. Modeling of dynamic hydrate shell growth on bubble surface considering multiple factor interactions //Chemical Engineering Journal. – 2018. – Т. 331. – С. 221-233.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
Российского научного фонда (РНФ № 25-19-00816,
<https://rscf.ru/project/25-19-00816/>).*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ АТМОСФЕРНОГО ЖИДКОТОПЛИВНОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА С ПАРОВЫМ РАСПЫЛОМ

Тарулин М.А., Копьев Е.П., Шарыпов О.В.

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

Эффективность сжигания жидкого топлива и снижение выбросов загрязняющих веществ во многом определяются возможностью оперативно контролировать режимные параметры горелочного устройства. Для таких систем построение точных физических диагностических моделей затруднено из-за сложности, нестационарности и многопараметричности процесса горения, поэтому перспективным направлением является использование методов компьютерного зрения и глубокого обучения.

Целью данной работы является разработка и валидация метода бесконтактного прогнозирования параметров работы атмосферного жидкотопливного горелочного устройства с паровым распылом и камерой газогенерации по изображениям пламени. В качестве целевых параметров выбраны расход топлива и расход перегретого водяного пара, которые в значительной степени определяют энергетические и экологические характеристики процесса сжигания низкокачественных жидких углеводородных топлив.

В качестве базовой архитектуры использована сверточная нейронная сеть DenseNet-121 с предобученными на ImageNet [1] весами. Для решения регрессионной задачи классификационный блок исходной сети был заменен специализированной подсетью вида $FC(1024) \rightarrow ReLU \rightarrow Dropout(0.3) \rightarrow FC(512) \rightarrow ReLU \rightarrow Dropout(0.2) \rightarrow FC(2)$, что позволило одновременно предсказывать два непрерывных технологических параметра по визуальным характеристикам факела.

Научная новизна работы состоит в адаптации архитектуры DenseNet-121 к задаче многомерной регрессии для пламени при паровом распыле, визуальные паттерны которого существенно отличаются от традиционных схем распыла. Плотные межслойные связи DenseNet обеспечивают эффективное повторное использование признаков и выделение тонких изменений формы и светимости факела, значимых для оценки режимных параметров.

Для обучения и тестирования модели использованы изображения пламени, полученные при сжигании дизельного топлива на лабораторном образце горелочного устройства тепловой мощностью до 20 кВт. Рассмотрено 32 режима горения и сформирована выборка объемом около 1700 изображений, которая была разделена на обучающую, валидационную и тестовую части в соотношении 80/10/10. Такой набор данных позволил оценить устойчивость модели к изменению формы, яркости и текстуры пламени при различных расходах топлива и распылителя.

Процесс обучения продемонстрировал устойчивую сходимость без выраженных признаков переобу-

чения: значения функции потерь на обучающей и валидационной выборках постепенно сближались и выходили на плато, а различие между ними оставалось незначительным. Это свидетельствует о достаточной обобщающей способности выбранной архитектуры и корректности примененных механизмов регуляризации.

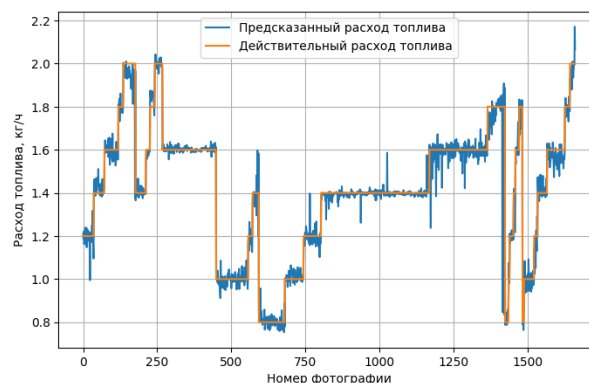


Рис. 1. Результаты предсказания расхода топлива.

На независимой тестовой выборке модель показала высокую точность прогнозирования (см. рис 1). Для расхода топлива получены значения $MAE = 3.8 \%$, $RMSE = 9 \%$ и коэффициент детерминации $R^2 = 0.957$; для расхода перегретого пара — $MAE = 2.6 \%$, $RMSE = 4 \%$ и $R^2 = 0.994$. Полученные результаты подтверждают способность модели улавливать сложные взаимосвязи между визуальными признаками факела и режимными параметрами работы горелочного устройства.

Практическая значимость работы заключается в возможности создания интеллектуального инструмента для оперативного бесконтактного контроля и оптимизации процессов сжигания жидких топлив в устройствах с паровым распылом и камерой газогенерации. Предложенный подход может быть использован при построении систем автоматизированного управления, а также при разработке методов снижения выбросов и повышения эффективности работы установок, в том числе при использовании низкокачественных топлив и жидких отходов.

Список литературы:

1. ImageNet [Электронный ресурс]. URL: <https://www.image-net.org/> (дата обращения: 27.10.2025).

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (126021217042-8).

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ КОНВЕКЦИИ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КАМЕРЕ СМЕШЕНИЯ: СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Ширяев Д.В.¹, Листратов Я.И.², Сапожников И.С.¹, Тутукин А.В.¹

¹ АО «НИКИЭТ»,

пл. Академика Доллежала 1к3, Москва, 107140, Россия

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

ул. Красноказарменная 14 стр. 1, Москва, 111250, Россия

Актуальность работы обусловлена ограниченным объемом экспериментальных и численных данных, описывающих процессы турбулентной конвекции и теплопереноса в жидкометаллических теплоносителях, особенно в условиях, характерных для высокотемпературных реакторных установок. Особый интерес представляют теплоносители, характеризующиеся низкими числами Прандтля и высокими значениями числа Рейнольдса, для которых адекватное описание режимов течения и теплообмена связано с существенными трудностями. Проведение прямых экспериментальных исследований в условиях ядерных энергетических установок сопряжено с рядом объективных ограничений, включая высокую стоимость экспериментов, конструктивные сложности и ограничения на размещение измерительной аппаратуры в реакторных контурах. В большинстве случаев установка дополнительных датчиков или организация более детализированной системы измерений оказывается технически затруднительной либо требует существенного изменения конструкции оборудования [1].

В этой связи численное моделирование становится одним из ключевых инструментов исследования процессов смешанной турбулентной конвекции. При этом получение достоверных численных результатов, пригодных для инженерного анализа, требует обязательной верификации и валидации применяемых моделей. Это предполагает систематическое сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными и подтверждение адекватности используемых моделей турбулентности физическим процессам, протекающим в реальных условиях эксплуатации.

В настоящей работе выполнено численное моделирование турбулентной смешанной конвекции свинцового теплоносителя в модели верхней камеры с использованием коммерческого программного комплекса STAR-CCM+. Математическая модель задачи основана на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS). Моделирование проведено для режима номинальной тепловой нагрузки, соответствующего экспериментальным данным.

В рамках работы рассмотрен и сопоставлён ряд наиболее распространённых RANS-моделей турбулентности, применяемых для расчёта высокорейнольдсовых течений: $k-\varepsilon$ Realizable, Spalart–Allmaras, $k-\omega$ SST и $k-\omega$ Wilcox. Основной целью исследования является сравнительный анализ указанных моделей турбулентности и выбор наиболее подходящей модели для описания процессов смешанной турбулентной конвекции свинцового теплоносителя в условиях мо-

дели верхней камеры. Для упомянутых моделей турбулентности представлены температурные поля (см. рис. 1).

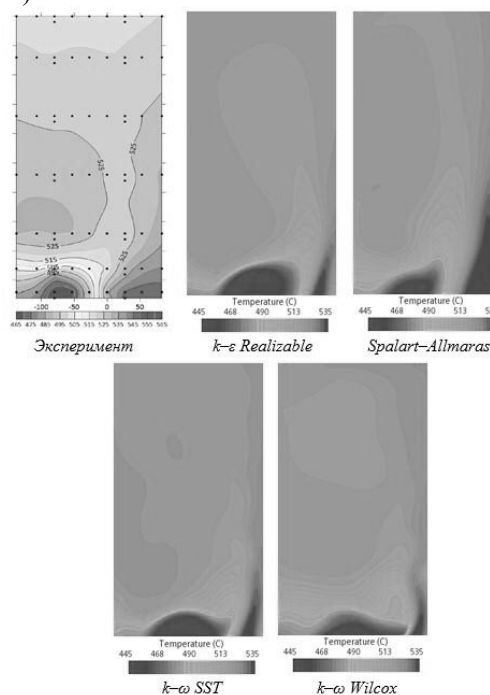


Рис. 1. Температурные поля

В ходе расчётов получены температурные поля в характерных сечениях камеры, которые сопоставлялись с экспериментальными данными, полученными с использованием термопарного зонда при углах его поворота -20° , -10° , 0° , 10° и 20° на различных высотных отметках. Это позволило детально проанализировать зону взаимодействия горячего и холодного потоков теплоносителя и оценить особенности их перемешивания в камере смешения. Сравнение численных и экспериментальных результатов использовано в качестве основного критерия оценки применимости рассматриваемых моделей турбулентности.

Полученные результаты направлены на обоснованный выбор RANS-модели турбулентности, обеспечивающей наилучшее согласование с экспериментальными данными, и могут быть использованы при дальнейшем численном моделировании теплогидравлических процессов в реакторных установках с жидкометаллическим свинцовым теплоносителем.

Список литературы:

1. Большухин М.А., Васильев А.Ю., Будников А.В., Патрушев Д.Н., Романов Р.И., Свешников Д.Н., Сухановский А.Н., Фрик П.Г. Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов, обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5. № 4. С. 469–480.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПРОФИЛЯ НАСА 0012 ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ

Шлыкова А.О.

Научно-технологический университет «Сириус»,
Олимпийский пр., д. 1, Федеральная территория «Сириус», 354340, Россия

В современных отраслях, таких как энергетика, авиация, ракетостроение, химическая и нефтегазовая промышленности, большое значение имеет определение характеристик потоков в каналах различной конфигурации. Обычно эти характеристики вычисляются с помощью математического моделирования. Традиционно для этого используются численные методы гидродинамики (CFD). Они обеспечивают высокую точность, однако их применение требует значительных вычислительных и временных ресурсов.

Существует альтернативный метод — физически-информированные нейронные сети (Physics-Informed Neural Networks, PINN). После обучения они позволяют быстро получать приближённые значения без необходимости решать систему уравнений Навье–Стокса при каждом новом расчёте. Вся вычислительная нагрузка приходится на этап обучения, и в процессе работы модель имеет минимальные вычислительные затраты. Функция потерь PINN обеспечивает учёт не только данных из обучающего набора, но и невязки по уравнениям физики. В CFD моделировании решение выполняется в дискретной форме на определенной сетке, в то время как PINN строит непрерывную аппроксимационную модель, учитывающую физические законы в любой точке пространства.

Цель работы — разработка и валидация метода моделирования стационарных течений при обтекании профиля НАСА 0012 в двумерной постановке на основе PINN с использованием CFD-расчётов в качестве опорного датасета, способного делать корректные предсказания в произвольной точке пространства.

Рассматривается канал длиной $L = 4$ и высотой $H = 2$ безразмерных единиц. Внутри расположен профиль с длиной хорды $l = 1$.

Изначально задача решалась численно методом конечных объемов в пакете программ ЛОГОС, чтобы сформировать обучающий набор данных. Для расчета рассматривалось ламинарное течение в канале. Граничные условия включали задание скорости на входе и условий прилипания на стенках. Вычислительная сетка состояла из ~13 000 узлов, на основе которой был сформирован эталонный датасет, включающий координаты x, y , значения скоростей u, v и давление p .

Датасет был применён для обучения модели и разделён на тренировочную и тестовую выборки. Для оптимизации процесса обучения тренировочная выборка была дополнительно сегментирована на поднаборы данных для граничных и внутренних точек. Каждый из поднаборов данных обучался с использованием функции потерь, соответствующей особенностям каждой группы точек.

Архитектура нейронной сети включала входной слой с координатами (x, y) , четыре скрытых полносвязных слоя по 256 нейронов с функцией активации

SELU и выходной слой, предсказывающий горизонтальную и вертикальную компоненты скорости и давление (u, v, p) . Функция потерь включала: среднеквадратичную ошибку (MSE) между предсказанием сети и эталонными CFD-данными; невязки системы уравнений Навье–Стокса и граничных условий (см. рис. 1).

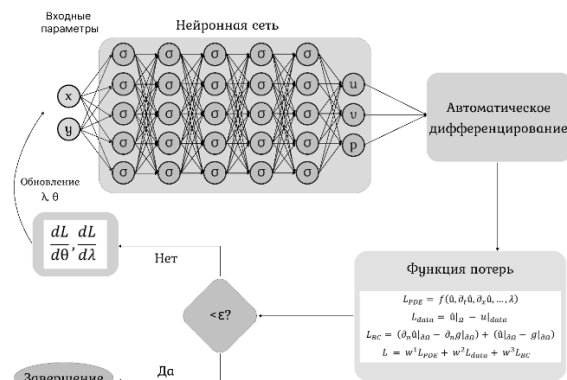


Рис. 1. Архитектура нейронной сети.

В результате обучения на прореженной сетке получена модель, обеспечивающая предсказание полей скоростей (u, v) и давления (p) с ошибкой не более 8% по совокупности метрик: средняя абсолютная ошибка (MAE), корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE), коэффициент детерминации R^2 , L^2 -норма ошибки и относительная ошибка.

Разработанный подход демонстрирует потенциал для дальнейшего решения задач с турбулентными режимами течения и может служить основой для создания универсального инструмента оперативного моделирования течений в областях со сложной геометрией.

Список литературы:

1. Шлыкова А. О., Шевченко Ю. А., Минин С. В., Королева А. П. Каскадная модель нейронной сети с физической поддержкой для предсказания потерь давления трехфазной смеси в трубопроводе // Компьютерные исследования и моделирование. 2026. Т. 18. № 1. С. 117–131.
2. Cai S., Mao Z., Wang Z. et al. Physics-informed neural networks (PINNs) for fluid mechanics: a review // Acta Mechanica Sinica. 2021. Vol. 37, No. 12. P. 1727–1738. DOI: 10.1007/s10409-021-01148-1.
3. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics informed learning machine. US Patent 10,963,540. 2021.

Результаты получены при финансовой поддержке проекта, реализуемого в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус»

(Соглашение № 18-03 от 10.09.2024).

ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Щинников П.А.

Новосибирский государственный технический университет

Важной стороной анализа энергетических установок является поиск оптимальных или наиболее выгодных решений при их создании и функционировании. Оптимальность определяется постановкой задачи, например, наилучшие параметры при обеспечении графика нагрузок с целью снижения расходов топлива или сочетание термодинамических и расходных характеристик с целью обеспечения максимума эффективности или стоимости, или снижения экологического воздействия или подобное. В каждом случае формируют целевую функцию, определяют оптимизируемые параметры, зависимые и независимые переменные, ограничения. Для многоцелевых энергоблоков используют эксергетический метод анализа.

Эксергетический метод термодинамического анализа

Для составления уравнений эксергетического баланса технической системы (энергоблока, агрегата) необходимо окружить рассматриваемую систему контрольной поверхностью и определить потоки входящей и выходящей эксергии:

$$\sum_{k \in V(i)} E_{ki}^x - \sum_{j \in W(i)} E_{ij}^y - \sum \Delta E_i = 0$$

где E_{ki}^x – подводимая эксергия с k -ым энергоносителем по k -му каналу связи; $V(i)$ – множество входов; E_{ij}^y – эксергия, подводимая с j -ым энергоносителем по j -му каналу связи; $W(i)$ – множество выходов; ΔE_i – потери эксергии; $E_i^y = \sum_{j \in W(i)} E_{ij}^y$ – эксергетическая производительность.

Представляя оптимизируемый энергоблок в виде графа (рис. 1) и используя метод неопределенных множителей Лагранжа, можно получить выражение функции цели в виде:

$$L = \sum_i \left[Z_i(E_i^y)_{X_i} - \lambda_i E_i^y + \lambda_i \sum_{j \in W(i)} E_{ij}^x(E_j^y)_{X_j} \right] = \sum L_i = L(E^X, E^Y, \Lambda)$$

где E^X – множество, компонентами которого служат все входные переменные всех функционирующих частей энергоблока; E^Y – множество оптимизируемых переменных; Λ – множители Лагранжа.

Можно видеть, что целевая функция учитывает затраты как в создание, так и в функционирование энергоблока, что позволяет решать ряд практических задач.

Предложенный подход успешно применен при решении оптимизационных задач для энергоблоков электростанций для блоков с термодобготовкой топлива [1], ГТ нанстроенных ТЭЦ [2], блоков повышенной эффективности [3], многоцелевых блоков [4], систем комбинированного теплоснабжения [5] и других [6-9].

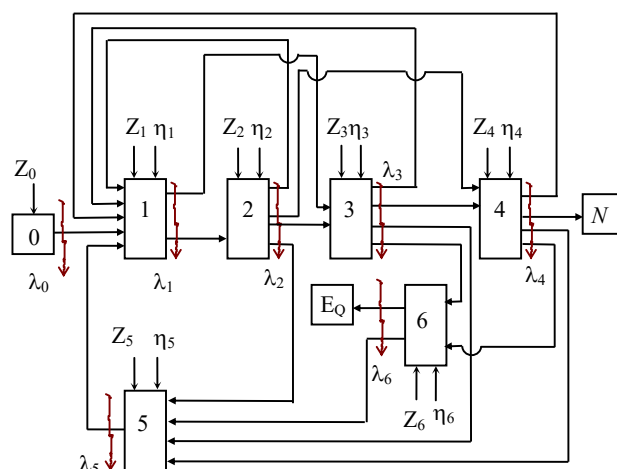


Рис.1. Эксергетическая структурная схема (граф) энергоблока: N, E_Q – потребители электроэнергии и теплоэксергии

Список литературы

1. Эффективность термодобготовки топлива для энергоблоков ТЭЦ / П.А. Щинников // Энергетика (Изв. ВУЗов и энергетических объединений СНГ). – 2000. – №1. – С. 57...61.
2. Энергосберегающая парогазовая технология реконструкции пы-леугольной ТЭЦ / Ноздренко Г.В., Ловцов А.А. // Теплофизика и аэромеханика. – 2002. – том 9. – №3. – С.445...449.
3. Повышение эффективности энергоблоков ТЭЦ / Коваленко П.Ю. и др. // Ползуновский вестник. – 2004. – №1. – С.210...214.
4. Мультиэнергоблок с комплексной переработкой твердого топлива / Щинников П.А. // Энергетика. (Изв. ВУЗов и энергетических объединений СНГ). – 2001. – №3. – С. 83...89.
5. Экономия топлива в системе за счет перевода ТЭЦ в комбинированный теплофикационный режим с внутриквартальными теплонасосными установками / Ноздренко Г.В., Томилов В.Г., Пугач Ю.Л. // Теплофизика и аэромеханика. – 2001. – т.8. – №1. – С. 143...149.
6. Комбинированное производство водорода на ТЭС / Кузьмин А.Г. и др. // Экология производства. Энергетика. – 2006. – №4. – С.13...14.
7. Эксергетический анализ новых котельных технологий в составе энергоблоков ТЭС / Ноздренко Г.В. и др. // Теплофизика и аэромеханика, 2009. – т.16., №2., С.331-340.
8. Complex Technical and Economic Studies of Vapor-Gas Units with Flow Gasifiers / Kuzmin A.G., and other // Thermal Engineering, 2010, Vol. 57, No. 14, pp. 1198–1204.
9. The Role of Health Factor in HPS Performance Characteristics / Shchinnikov P.A. // Thermal Engineering, 2011, Vol. 58, No. 10, pp. 841–844.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ГИДРИДОВ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНЫХ ЧИСЛЕННЫХ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Эльман Р.Р., Кудияров В.Н., Саядян А. К.

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

Разработка высокоэффективных систем хранения водорода является важной задачей современного материаловедения и водородной энергетики. Среди существующих методов хранения особое внимание привлекает способ хранения в металлгидридах, обеспечивающий объемную плотность до $110 \text{ кг H}_2/\text{м}^3$ при давлении 1–40 бар, что существенно выше показателей сжатого и сжиженного водорода [1]. Однако ключевым барьером на пути развития данной отрасли остается проблема эффективного теплового менеджмента. Процессы абсорбции и десорбции водорода являются экзотермическими и эндотермическими соответственно, при этом низкая теплопроводность гидридной засыпки ($0,1\text{--}0,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) приводит к затруднениям при отводе или подводе тепла, что снижает эффективность работы системы, а интенсивный тепловой поток может привести к перегреву реакционной зоны, создавая термическое сопротивление, которое лимитирует общую скорость процесса.

Для решения задач оптимизации конструкции и режимов работы металлгидридных систем все более широкое применение находят методы математического моделирования. Разработка адекватных математических моделей позволяет проводить виртуальные испытания реакторов различной конфигурации, оценивать влияние конструктивных параметров и режимных факторов на эффективность работы системы [2]. Современные тенденции включают не только классические подходы на основе численных методов, но и применение методов машинного обучения для быстрой оценки эффективности работы системы без проведения детального моделирования.

В настоящей работе представлен комплексный подход к многокритериальной оптимизации металлгидридной системы хранения водорода. Разработана математическая модель, учитывающая связанные процессы тепломассопереноса в пористой среде, кинетику сорбции и десорбции водорода, а также включающая ПИД-регулятор для управления расходом газа в соответствии с требуемыми режимами работы. Модель реализована в программном пакете COMSOL Multiphysics 6.4.

Для описания свойств равновесного давления в модели заданы интерполяционные функции, представляющие собой экспериментально полученные изотермы давление-состав (PCI) при абсорбции и десорбции. Для расчета использовались уравнения неразрывности и Навье-Стокса для описания поля течения газа в свободном объеме, уравнение Бринкмана для описания течения газа через пористую среду, а также уравнение сохранения энергии. Кинетика реакций абсорбции и десорбции описывается с использованием энергии активации и констант. Источник

массы и выделяемая энергия рассчитываются с учетом изменения плотности и пористости гидридной засыпки в процессе реакции. В модели также реализовано управление клапаном через изменение вязкости, что позволяет моделировать процессы зарядки и разрядки в динамических режимах, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Ключевым элементом исследования является создание пользовательского скрипта в среде MATLAB с использованием LiveLink, автоматизирующего последовательность параметрических расчетов и реализующего алгоритм многокритериальной оптимизации. Разработанный скрипт выполняет полный цикл для каждой особи популяции: корректирует параметры с учетом физических ограничений, строит геометрию, создает адаптивную сетку, запускает расчет в COMSOL и извлекает результаты. Целевыми функциями выступают: минимизация массы системы, максимизация емкости водорода, максимизация эффективности теплообмена и минимизация времени достижения 90% насыщения/разрядки.

Верификация разработанной модели проведена на экспериментальных данных для сплава LaNi_5 . В дальнейшем планируется адаптация разработанного подхода для исследования перспективных композиционных материалов на основе гидрида магния с добавлением углеродных нанотрубок и наноразмерного никеля. Исследовано влияние количества теплообменных ребер на эффективность процессов сорбции и десорбции.

Полученный в ходе параметрических расчетов массив данных сформировал основу для обучения нейросетевой модели в среде MATLAB. Обучение на верифицированных данных позволит в дальнейшем ускорить оценку эффективности новых конструкций реакторов, исключив необходимость проведения ресурсоемких численных расчетов на этапе предварительного проектирования. Разработанный скрипт предусматривает интеграцию нейросетевой модели в качестве суррогатной функции для ускорения процесса оптимизации.

Список литературы:

1. Abdimomyn S. et al. Hydrogen storage materials: Promising materials for Kazakhstan's hydrogen storage industry // Eurasian Chemico-Technological Journal. 2024. Vol. 26, N. 3. P. 113-132.
2. Kukkapalli V. K., Kim S., Thomas S. A. Thermal management techniques in metal hydrides for hydrogen storage applications: a review // Energies. 2023. Vol. 16, N. 8. Article number 3444.

*Работа поддержана РНФ
(грант № 25-79-00064).*

СЕКЦИЯ 4

Теплофизические свойства веществ и новые материалы



ТЕПЛОЁМКОСТЬ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ТРИМОЛИБДАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ (K, Rb, Cs) В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 5–330 К

Беспятов М.А., Трифонов В.А., Кузин Т.М., Гельфонд Н.В.

Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
пр. Лаврентьева 3, Новосибирск, 630090, Россия

Тримолибдаты щелочных металлов состава $M_2Mo_3O_{10}$ ($M = K, Rb, Cs$) являются перспективными функциональными материалами, которые рассматриваются как потенциальные объекты для применения в оптике, нелинейной фотонике, катализе и ионной проводимости. Их кристаллическая структура включает молибдатные фрагменты, формирующие пространственный каркас, внутри которого располагаются щелочные катионы. Изоструктурность данных соединений делает их удобной модельной системой для анализа влияния катионного замещения на термодинамические характеристики.

Несмотря на установленную к настоящему времени кристаллическую структуру тримолибдатов щелочных металлов, их термодинамические свойства остаются изученными недостаточно полно. В частности, в литературе отсутствуют экспериментальные данные о теплоёмкости этих соединений в области низких температур.

Теплоёмкость твёрдых тел является чувствительным параметром, отражающим особенности фононного спектра и отклонения от гармонического поведения колебательной системы. Её анализ позволяет выявлять фазовые переходы. На основе экспериментальных данных по теплоёмкости рассчитываются интегральные термодинамические функции (энтропия, энтальпия и приведённая энергия Гиббса), необходимые для термодинамического описания устойчивости фаз и сравнительного анализа изоструктурных систем.

Настоящая работа посвящена исследованию теплоёмкости монокристаллов $K_2Mo_3O_{10}$, $Rb_2Mo_3O_{10}$ и $Cs_2Mo_3O_{10}$ в диапазоне температур 5–330 К, а также расчёту на их основе ключевых термодинамических характеристик.

Выращивание монокристаллических образцов тримолибдатов щелочных металлов производилось методом спонтанной кристаллизации из расплава. Элементный и фазовый состав кристаллов был подтвержден методами масс-спектрометрии (спектрометр Agilent 8800) и рентгенофазового анализа (дифрактометр Shimadzu XRD-7000); содержание примесей в образцах не превышала 0.001 масс. %.

Прецизионные данные о теплоёмкости для монокристаллов $K_2Mo_3O_{10}$, $Rb_2Mo_3O_{10}$ и $Cs_2Mo_3O_{10}$ были получены адиабатическим методом в интервале 5 – 330 К с помощью адиабатического калориметра БКТ-20 [1]. В функциональном поведении теплоёмкости $K_2Mo_3O_{10}$ выявлена λ -аномалия в диапазоне 150–190

К, с максимумом при ≈ 188.5 К, соответствующая фазовому переходу второго рода; для Rb- и Cs-содержащих соединений отклонений не обнаружено. Экспериментальная теплоёмкость была аппроксимирована сплайн-функциями и экстраполирована к 0 К по закону Дебая. На основе сглаженных значений теплоёмкости были рассчитаны термодинамические функции (энтропия, приращение энтальпии и приведенная энергия Гиббса) в интервале 0 – 330 К.

На основе экспериментальных данных о теплоёмкости вблизи 0 К определена характеристическая температура Дебая $\Theta_D(0)$ для $K_2Mo_3O_{10}$, $Rb_2Mo_3O_{10}$ и $Cs_2Mo_3O_{10}$. Изоструктурный характер ряда $M_2Mo_3O_{10}$ позволил установить систематическое влияние катионного замещения на фононный спектр. При переходе от K^+ к Cs^+ наблюдается смещение низкочастотной области колебательного спектра и изменение характеристической температуры Дебая $\Theta_D(0)$.

Все представленные в настоящей работе результаты получены впервые.

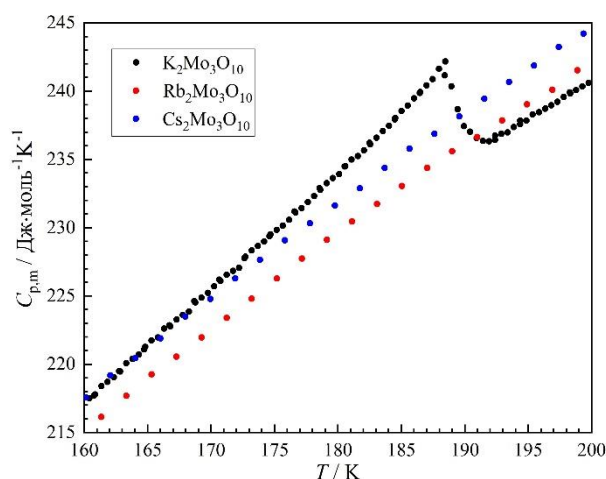


Рис. 1. Экспериментальная теплоёмкость $K_2Mo_3O_{10}$ (чёрный), $Rb_2Mo_3O_{10}$ (красный) и $Cs_2Mo_3O_{10}$ (синий).

Список литературы:

1. Bespyatov M.A. // J. Chem. Eng. Data 2025. V. 70. P. 3630.

Работа поддержана РФФ
(грант № 24-19-00405,
<https://rscf.ru/project/24-19-00405/>).

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛАНТАНА И САМАРИЯ
В ОБЛАСТИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПЛОТНОСТЕЙ И ТЕМПЕРАТУР****Боярских К.А., Хищенко К.В.**Объединенный институт высоких температур РАН,
ул. Ижорская 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

Редкоземельные металлы находят свое применение при решении обширного круга научных задач, таких как производство материалов, устойчивых к интенсивным механическим и тепловым нагрузкам, и изготовление постоянных магнитов. По этой причине необходимо знать термодинамические свойства этих элементов в широком диапазоне температур и плотностей.

Настоящая работа посвящена описанию термодинамических характеристик двух редкоземельных металлов (лантана и самария) в области жидкой фазы при высоких давлениях и температурах. Предложены уравнения состояния, описывающие свойства расплавов этих металлов при ударном сжатии и тепловом расширении.

Термодинамическая модель, на которой основывается описание свойств жидких металлов, представлена в термодинамически полной форме: как зависимость удельной свободной энергии от удельного объема и абсолютной температуры. Эта зависимость включает холодную часть, определяющую внутреннюю энергию в виде функции от объема на изотерме ноль кельвинов, а также тепловые вклады ионной и электронной подсистем. Для ионной подсистемы зависимость свободной энергии от своих естественных переменных задается в рамках квазигармонического приближения, а для электронной подсистемы – на основе модели вырожденного ферми-газа. Построенная на основе указанных теоретических представлений полуэмпирическая зависимость позволяет описывать термодинамику жидких металлов при высоких плотностях энергии.

Используемая термодинамическая модель содержит параметры (константы), значения которых определяют индивидуальность результатов расчета для каждого отдельного вещества. Эти значения находятся из условия наилучшего описания имеющихся экспериментальных данных при высоких температурах и давлениях. Тепловое расширение жидких лантана и самария при высоких температурах исследовалось методами максимального давления в газовом пузыре и большой капли, а также с применением бесконтактных способов с помощью проникающего гамма-излучения и электростатической левитации расплавленных образцов. Сжимаемость исследуемых материалов при высоких давлениях изучалась с помощью традиционной техники ударных волн.

По имеющимся экспериментальным данным определены параметры уравнений состояния жидких лантана и самария. По полученным уравнениям состояния произведены расчеты характеристик металлов в процессах, соответствующих условиям рассмотренных опытов. Достигнуто согласие модельных зависимостей с экспериментальными данными в пределах погрешностей измерений.

Результаты настоящей работы могут быть использованы в гидродинамическом моделировании теплофизических процессов в расплавах лантана и самария при высокой концентрации энергии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (грант № 25-19-00944,
<https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).*

МОНОКРИСТАЛЛ ТРИМОЛИБДАТА НАТРИЯ-ЦЕЗИЯ: ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА

Беспятов М.А.¹, Шевелев Д.П.¹, Трифонов В.А.¹, Мостович Е.А.², Назарова А.А.¹, Кузин Т.М.¹,
Черняйкин И.С.¹, Гельфонд Н.В.¹

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
пр. Лаврентьева 3, Новосибирск, 630090, Россия

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

Криогенные сцинтилляционные болометры, применяемые в экспериментах по регистрации редких событий, требуют материалов с контролируруемыми теплофизическими характеристиками в широкой области температур, высокой степенью химической и фазовой однородности, а также стабильными люминесцентными параметрами. В качестве потенциальных сцинтилляторов рассматриваются двойные молибдаты щелочных металлов, для которых сочетание структурной устойчивости и оптической активности может обеспечить эффективное преобразование энергии излучения в измеряемый сигнал. Соединение тримолибдата натрия-цезия $\text{NaCsMo}_3\text{O}_{10}$ относится к малоизученным представителям данного класса, и отсутствие систематических данных о его теплоёмкости и низкотемпературной люминесценции ограничивает оценку его функциональных свойств. В связи с этим целью работы является установление термодинамических характеристик и спектральных параметров данного материала в широком интервале температур.

Монокристалл большого размера тримолибдата натрия-цезия $\text{NaCsMo}_3\text{O}_{10}$ (Рис. 1) был получен низкоградиентным методом Чохральского, обеспечившим формирование оптически однородного образца. Фазовый состав контролировался методом рентгенофазового анализа, элементный - методом масс-спектрометрии; содержание примесей составило менее 0.002 масс.%. Из выращенного монокристалла были изготовлены образцы для калориметрических исследований.

Теплоёмкость определялась в области 5–330 К адиабатическим методом (калориметр БКТ-20 [1]), а при более высоких температурах, вплоть до плавления ($T_{\text{onset}} = 809 \pm 1$ К) - методом дифференциальной сканирующей калориметрии (калориметр Netzsch DSC 204 F1 Phoenix). В исследованном интервале температур помимо плавления дополнительных фазовых переходов не обнаружено.

Полученные низкотемпературные данные о теплоёмкости позволили рассчитать характеристическую температуру Дебая $\Theta_D(0)$, описывающую поведение теплоёмкости вблизи 0 К.

Экспериментальные данные о теплоёмкости аппроксимировались функциями Эйнштейна с помощью программы CrFIT [2] с последующим расчётом

термодинамических функций (энтропии, энтальпии и приведенной энергии Гиббса) во всей температурной области существования твёрдой фазы.

Впервые для тримолибдата натрия-цезия $\text{NaCsMo}_3\text{O}_{10}$ в интервале 77 - 300 К получены спектры фотолюминесценции и определены времена затухания излучения. Установлено, что материал при этих температурах проявляет интенсивное излучение в диапазоне 600 - 800 нм, характерное для молибдатных матриц.

Впервые полученные данные по теплоёмкости и люминесцентным свойствам позволяют обоснованно рассматривать $\text{NaCsMo}_3\text{O}_{10}$ как перспективный сцинтилляционный материал для криогенных болометров.



Рис. 1. Монокристалл $\text{NaCsMo}_3\text{O}_{10}$, выращенного в направлении $[001]$.

Список литературы:

1. Bespyatov M.A. // J. Chem. Eng. Data 2025. V. 70. P. 3630.
2. Voskov A.L., Kutsenok I.B., Voronin G.F. // Calphad. 2018. V. 61. P. 50.

Работа поддержана РФФ
(грант № 24-19-00405,
<https://rscf.ru/project/24-19-00405/>).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НИОБИЯ И МАТЕРИАЛОВ С НИМ В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТА ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Маевский К.К.

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

Интерес к ниобию (Nb) обусловлен сочетанием его свойств, таких как тугоплавкость, способность образовывать жаропрочные, сверхпроводящие и другие сплавы, коррозионная стойкость. При взаимодействии ниобия и графита образуются карбиды Nb_2C и NbC , твёрдые жаропрочные соединения. Применяется Nb в различных областях: от ракетостроения, авиационной и космической техники до радиотехника, электроника и атомной энергетики. В связи с этим большое внимание уделяется исследованиям поведения Nb и материалов на его основе [1, 2].

Численное моделирование термодинамических параметров ударно-волнового нагружения Nb и сплавов на его основе, а также карбидов Nb в данной работе выполнено в представлениях термодинамически равновесной модели [3, 4], которая позволяет достоверно описывать данные экспериментов в широком диапазоне значений давления и пористости для гомогенных и гетерогенных материалов.

При расчетах используется предположение о том, что все компоненты исследуемого материала при высокоэнергетическом воздействии находятся в термодинамическом равновесии, предполагающем равенство значений давления, температуры и скоростей компонентов. Уравнения для конденсированного компонента записываются в виде суммы потенциальных и тепловых компонентов давления P_C , P_T , и удельной энергии, при этом ρ , ρ_0 – текущая и начальная плотность, $\sigma = \rho/\rho_0$ – степень сжатия, T , T_0 – температура текущая и при нормальных условиях, а $\tau = T/T_0$ – относительная температура [3]:

$$P_C(\sigma) = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\sigma^n - 1),$$

$$P_T(\sigma, \tau) = c_{v0} \rho_0 T_0 (\tau - 1) \sigma k \frac{1 + a_1 \tau}{1 + a_2 \tau}.$$

Здесь c_{v0} и c_0 соответственно значение теплоемкости и скорости звука в нормальных условиях при $T=T_0$. С учетом области применения модели для областей значения давления больше 1 ГПа, начальная энергия при нормальных условиях не учитывается.

Для построения ударных адиабат гетерогенных материалов выписываются условия сохранения потока массы для каждого компонента смеси и условия сохранения потоков импульса и энергии для смеси в целом на фронте ударной волны. При этом газ в пороках рассматривается как один из компонентов. Данный подход позволяет моделировать как гетерогенные материалы, так и чистые вещества. В последнем случае расчет проводится для смеси с одним конденсированным компонентом.

Наличие возможности расчета поведения гетерогенных материалов по модели [3, 4], позволяет достоверно моделировать параметры карбида ниобия при ударно-волновом нагружении, рассматривая его как смесь компонентов исследуемого образца [5, 6], для углерода рассматривается алмазная фаза (рис. 1).

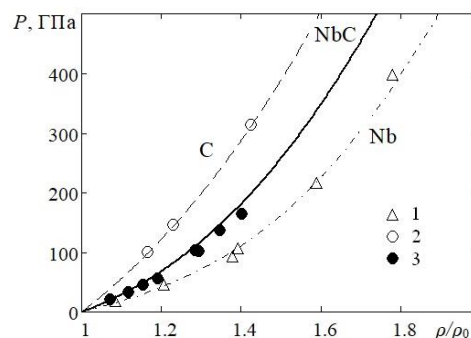


Рис. 1. Ударные адиабаты: C, Nb, NbC. Данные: [6].

Таким образом, в работе построены термодинамически согласованные мало-параметрические уравнения состояния для Nb. Определены параметры уравнений, позволяющие достоверно описывать значения теплоемкости, энтропии, и термодинамического потенциала Гиббса. При малом количестве параметров, определяемых по соответствию экспериментальным данным, получено достоверное описание ударно-волнового нагружения Nb, а также сплавов на его основе и карбидов ниобия. Результаты численного моделирования хорошо соответствуют данным, полученным на основании экспериментов, и не противоречат расчетами других авторов. Данная модель может быть полезной при расчетах термодинамических параметров материалов при высокоэнергетическом воздействии.

Список литературы:

1. Senkov O.N., Rao S.I., Butler T.M., Chaput K.J. Ductile Nb alloys with reduced density and cost // J. Alloys Compd. 2019. V. 808. P. 151685.
2. Khishchenko K.V. Equation of state for niobium at high pressures // Math. Montisnigri. 2020. V. 47 P. 119–123.
3. Маевский К.К. Моделирование высокоэнергетического воздействия на кальцит с учетом фазового перехода // ПМТФ. 2025. №2 (390). С. 55–62.
4. Маевский К.К. Численное моделирование высокоэнергетического воздействия на Al_2O_3 // Вестник ТГУ Математика и механика. 2025. Т. 94. С. 163–174.
5. Маевский К.К. Численное моделирование поведения карбидов при высокоэнергетическом воздействии // Журнал технической физики. 2022. Т. 92, № 1. С 100–107.
6. Levashov P.R., Khishchenko K.V., Lomonosov I.V., Fortov V.E. // AIP Conf. Proc. 2004. V. 706. P. 87.

Работа поддержана Бюджетным проектом
ГЗ_FWGG–2026–0003.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ГИДРОФТОРЭФИРОВ РАЗЛИЧНЫХ СОСТАВОВ

Молчанов Т.И., Кукшинов Н.В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
ул. 2-я Бауманская 5, стр. 4, Москва, 105005, Россия

Для образцов фторсодержащей диэлектрической жидкости (гидрофторэфир) различных составов и степени загрязненности экспериментально получены зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры методами поднятия жидкости в капилляре и оптическим методом (методом висячей капли).

Введение.

В настоящее время двухфазное охлаждение с использованием низкикипящего диэлектрического теплоносителя на основе гидрофторэфира считается перспективным методом отвода тепла от теплонагруженных элементов. Чаще всего в таких системах охлаждения применяются гидрофторэфиры HFE-7100 и HFE-7000. Поскольку хладагент напрямую контактирует с элементами оборудования, его теплофизические свойства могут меняться из-за химического взаимодействия с компонентами, что влияет на ключевой для системы процесс парообразования. В связи представляет интерес определение зависимостей коэффициента поверхностного натяжения от температуры для разных образцов гидрофторэфиров: чистых веществ, их смесей, а также загрязненных теплоносителей.

Методика экспериментального исследования.

Коэффициент поверхностного натяжения играет одну из ключевых ролей в процессе парообразования, в частности характеризует тип центров парообразования (отвечает за капиллярность), используется при определении критического радиуса пузыря при гомогенном и гетерогенном кипении, отрывного диаметра, а также является составляющей критериев подобия Кутателадзе, Лапласа, Веббера, Тейлора, Марангони, Бонда (Этвеша) [1-2].

Для определения коэффициента поверхностного натяжения использовалось два метода: метод поднятия жидкости в капилляре и расчет по формуле Жюрена, и оптический метод (метод висячей капли). Исследование проводилось в диапазоне температур от 273 К до температуры насыщения жидкостей при атмосферном давлении.

В качестве испытуемых образцов были взяты образцы теплоносителя – HFE-7100, HFE-7000, их смесь в составе 50/50 по массовой доле, а также загрязненный полиэтиленом HFE-7100 [3].

В качестве расчетного метода оценки использовался метод Миллера для чистых жидкостей и их смесей [4].

Результаты исследования.

Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры (рис. 1) демонстрирует, что присутствие загрязнения приводит к резкому возрастанию значения, среднее квадратичное отклонение составляет 25%. Это, вместе с повышением кинематической вязкости [3], также подтверждает наличие включений молекул полиэтилена (метиленовых цепей) как полимерного загрязнения, влияющего на адсорбцию макромолекул на границе фаз. Среднее квадратичное отклонение капиллярного метода от оптического составляет менее 2%. Отклонение экспериментальных данных от расчетного метода Миллера составило также менее 2%, что подтверждает удовлетворительную точность экспериментальных методов.

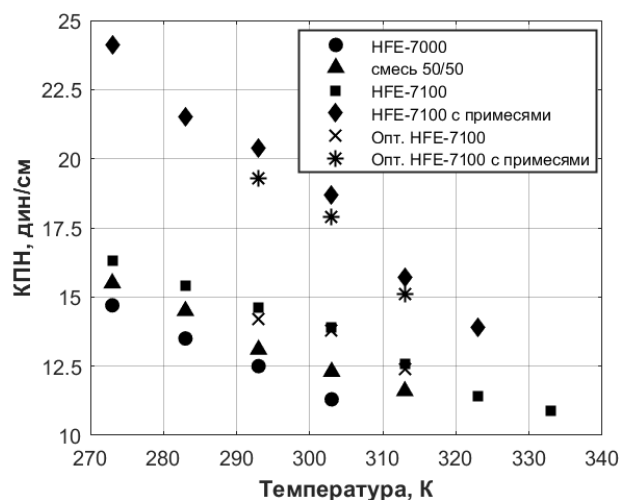


Рис. 1. Зависимость КПН от температуры

Список литературы:

1. Kutateladze S. S., Gogonin I. I. Growth rate and detachment diameter of a vapor bubble in free convection boiling of a saturated liquid // High Temperature. – 1980. – Т. 17. – №. 4. – С. 667-671
2. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат. – 1979. – 416 с.
3. Молчанов Т. И., Кукшинов Н.В. Исследование вязкости и состава гидрофторэфира различной степени загрязнения // Известия вузов. Физика. – 2026. – Т. 69, № 1(818). – С. 37-43.
4. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей : справочное пособие / пер. с англ. под ред. Б. И. Соколова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, Ленингр. отделение, 1982. – 592 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПОРИСТОГО ЯЧЕИСТОГО МАТЕРИАЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

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

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

В качестве теплозащитного покрытия конструкции объектов космической техники от внешнего интенсивного теплового воздействия могут быть использованы высокопористые теплоизоляционные материалы с низкой теплопроводностью, в частности, высокопористые ячеистые материалы, теплофизические свойства которых существенно зависят от давления газа внешней среды. Целью данной работы является методика идентификации свойств подобных материалов, функционирующих в условиях не только изменяющихся тепловых нагрузок, но и переменного давления. Для определения теплофизических характеристик (ТФХ) современных конструкционных, теплозащитных и теплоизоляционных материалов (в частности, зависящих от температуры и давления) весьма эффективными являются методы, основанные на решении обратных задач теплопроводности. Исходные данные для таких задач формируются на основе результатов измерений и включают в себя граничные условия (первого или второго рода) и зависимости температуры от времени в точках установки термопар. Тип граничных условий и число точек измерения температуры должны удовлетворять условиям единственности решения анализируемой обратной задачи.

В общем случае, передача теплоты в высокопористых материалах осуществляется посредством: теплопроводности твердой фазы, образующей структуру материала, теплопроводности газа, заполняющего поры материала, конвекции газа, в среде которого находится материал, излучения от частиц твердого каркаса материала. В большинстве практических случаев можно пренебречь конвективным переносом теплоты в высокопористых материалах, так как очень малые размеры пор и микрозазоров между волокнами материала препятствуют возникновению конвективных токов под действием температурного градиента. Конвективный теплообмен в порах пренебрежимо мал при величинах $GrPr < 103$, что справедливо для частиц диаметром не более 4 – 6 мм [1]. Большинство реальных высокопористых ячеистых и волокнистых материалов имеет размер частиц меньше указанного.

Эффективная теплопроводность ВПЯМ λ_{eff} может быть определена как сумма теплопроводности твердой фазы материала λ_s , теплопроводности газовой фазы λ_g и радиационной теплопроводности λ_r :

$$\lambda_{eff} = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r$$

В качестве математической модели теплопереноса в образцах материала использовалась одномерная математическая модель с граничными условиями второго и первого рода [2]:

$$C(T, P) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T, P) \frac{\partial T}{\partial x} \right),$$

$$0 < x < b, \quad 0 < \tau \leq \tau_{max},$$

$$T(x, 0) = T_0(x), \quad 0 \leq x \leq b,$$

$$-\lambda(T(0, \tau), P(0, \tau)) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q_1(\tau),$$

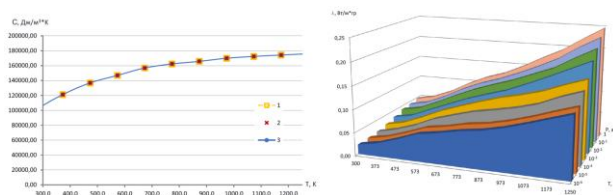
$$T(b, \tau) = T_2^{экс}(\tau),$$

в которой коэффициенты C , λ являются функциями температуры и давления, а величины q_1 и T_2 – зависят от времени.

В качестве материала для экспериментального определения зависимости ТФХ были использованы образцы углеродного высокопористого ячеистого материала (ВПЯМ) с различным числом РРІ (пор на дюйм) в условиях нестационарного кондуктивно-радиационного нагрева в диапазоне температур от комнатной до 250°C в вакууме при постоянном давлении $1,0 \times 10^{-6}$ бар, при переменном вакууме в диапазоне давлений от $1,0 \times 10^{-4}$ бар до $1,0 \times 10^{-1}$ бар и при давлении 1,0 бар. Тепловые испытания образцов материала проводились с использованием специально разработанного и изготовленного экспериментального модуля и технических средств тепловакуумного комплекса ВТС-ОЗТ [3] в МАИ.

Для определения нестационарных тепловых потоков на нагреваемой и обратной сторонах образцов были установлены датчики нестационарных тепловых потоков, изготовленные из керамического материала.

Результаты расчетно-экспериментального определения ТФХ, зависящих от температуры и давления, приведены на рисунке.



Список литературы:

1. Лыков А.В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1978, с. 479.
2. Будник С.А., Ненарокомов А.В., Титов Д.М., Ревизников Д.Л. Идентификация характеристик теплотехнических материалов в условиях нестационарного нагрева при изменении давления на основе решения обратных задач теплообмена. 1. Разработка вычислительных алгоритмов. Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97. № 5. С. 1105-1117.
3. Алифанов О.М., Будник С.А., Михайлов В.В., Ненарокомов А.В. Экспериментально-вычислительный комплекс для исследования теплофизических свойств теплотехнических материалов. Тепловые процессы в технике, 2009, том 1, №2, с.49-60.

Работа поддержана РФФ
(грант № 25-19-00131).

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ЛЮМИНИСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЛИТИЙ-РУБИДИЕВОГО ТРИМОЛИБДАТА

Беспятов М.А.¹, Шевелев Д.П.¹, Трифонов В.А.¹, Мостович Е.А.², Назарова А.А.¹, Гельфонд Н.В.¹

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
пр. Лаврентьева 3, Новосибирск, 630090, Россия

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

В настоящее время активно ведутся поиски новых сцинтилляционных материалов и изучение их свойств. Неорганические монокристаллические сцинтилляторы находят применение в таких областях, как медицинская визуализация, ядерная безопасность, физика высоких энергий и другие. Двойные молибдаты щелочных металлов являются перспективными сцинтилляционными материалами. В связи с этим актуальной задачей является изучение их термодинамических и люминесцентных свойств при низких температурах.

В данной работе был выращен оптически однородный монокристалл тримолібдата литий-рубидия $\text{LiRbMo}_3\text{O}_{10}$ с помощью низкоградиентного метода Чохральского и охарактеризован на состав и содержание примесей методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектроскопии на спектрометрах Agilent 8800 и Гранд-ИСП, соответственно. Суммарное содержание примесей не превышает $1 \cdot 10^{-2} \%$ мас. С помощью рентгенофазового анализа (дифрактометре Shimadzu XRD-7000) подтверждена однофазность полученного монокристалла. Термогравиметрический анализ с синхронным получением DSC-сигнала для выявления тепловых эффектов выполнен в интервале 300–1000 К с использованием прибора Netzsch STA 449 F1 Jupiter. На DSC-кривой для $\text{LiRbMo}_3\text{O}_{10}$ наблюдается эндотермический пик, связанный с плавлением вещества; температура начала плавления $T_{\text{onset}} = 785 \pm 1$ К. Других тепловых эффектов, связанных с фазовыми переходами, в исследуемом диапазоне температур не обнаружено.

Из выращенного монокристалла был изготовлен образец в виде цилиндра по размерам внутренней полости контейнера для образца калориметра (см. Рис. 1). Теплоёмкость монокристаллического образца $\text{LiRbMo}_3\text{O}_{10}$ была измерена в интервале от 6 К до 330 К с помощью низкотемпературного вакуумного адиабатического калориметра БКТ-20. Надежность калориметрического прибора была подтверждена измерениями теплоемкости бензойной кислоты и меди [1]. Относительные отклонения измеренной теплоемкости бензойной кислоты и меди от рекомендуемых значений составили: 2.0% – в интервале 5–15 К, 0.7% – в интервале 15–30 К, 0.2% – выше 30–330 К.

Полученные экспериментальные данные были использованы для определения характеристической температуры Дебая $\Theta_D(T \rightarrow 0 \text{ К})$. Используя данные о $\Theta_D(T \rightarrow 0 \text{ К})$ и сглаженные значения теплоёмкости, были рассчитаны термодинамические функции (теплоёмкость, энтропия, приращение энтальпии, приведенная энергия Гиббса) в интервале 0 – 330 К.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) и возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ) монокристалла регистрировались с помощью спектрофлуориметра HORIBA FluoroLog3 в диапазоне температур 77–300 К. Температурно-зависимые измерения проводили в криостате. Спектры ФЛ и ВФЛ были скорректированы с учетом интенсивности источника и спектрального отклика испускания. Определена температурная зависимость времени жизни люминесценции.

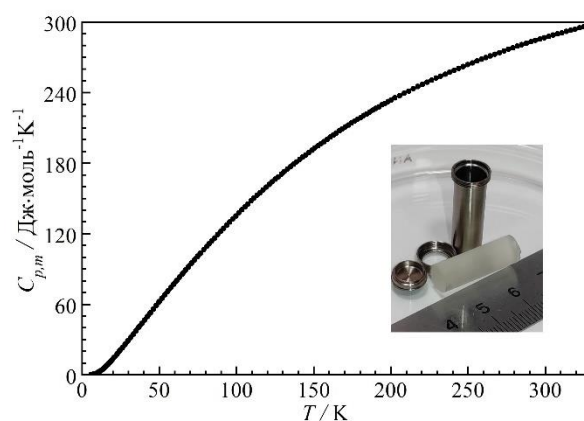


Рис. 1. Экспериментальная теплоёмкость монокристалла тримолібдата литий-рубидия.

Список литературы:

1. Bespyatov M.A. // J. Chem. Eng. Data 2025. V. 70. P. 3630

Работа поддержана РФФ
(грант № 24-19-00405,
<https://rscf.ru/project/24-19-00405/>).

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ СВИНЦА И ВИСМУТА
ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ И ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКЕ**

Обручкова Л.Р., Боярских К.А., Середкин Н.Н., Хищенко К.В.

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

Изучение фазовых превращений вещества в процессах интенсивного импульсного энерговклада и последующего разлета вещества представляет интерес, как с точки зрения получения фундаментальных знаний о поведении различных материалов при высоких давлениях и температурах, так и с точки зрения ответа на вопрос о пределах стойкости материалов при больших механических и термических нагрузках. В настоящей работе представлены результаты расчета термодинамических характеристик двух металлов (свинца и висмута) в волнах ударного сжатия и изоэнтропического расширения ударно-сжатых образцов различной

исходной пористости. В основе расчета лежит термодинамически полное уравнение состояния металлов в форме свободной энергии как функции объема и температуры. В расчете учитываются плавление, достигаемое на стадии нагружения, и испарение вещества на стадии разгрузки. Результаты расчетов представлены на фазовой диаграмме рассматриваемых металлов в сопоставлении с имеющимися данными из ударно-волновых экспериментов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (грант № 25-19-00944,
<https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).*

ТАЯНИЕ СЛОЯ ЛЬДА ПРИ РАДИАЦИОННОМ НАГРЕВЕ ВНУТРИ КАМЕРЫ

Саввинова Н.А.¹, Слепцов С.Д.²¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
ул. В.Г. Белинского 58, Якутск, 677000, Россия² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Поглощение излучения газами и следующее за ним повышение температуры известно как парниковый эффект в среде и впервые был описан Жозефом Фурье [1]. Данный эффект наблюдается как в природе, так и в искусственно созданных условиях: в теплицах, в домах, в различных приборах и установках. В работах [2-3] рассматривались условия, когда внутри климатической камеры поддерживалась постоянная температура и парниковый эффект в этих задачах не рассматривался. Однако, при таянии льда [4], диссоциации газовых гидратов, при получении различных материалов под облучением от искусственных источников в атмосфере замкнутого пространства, коими могут являться различные экспериментальные и технологические установки, высвобождаются газы, которые, поглощая излучение, могут создавать условия для локального парникового эффекта. В этом случае, из-за повышения температуры внутри камеры, может возникнуть перегрев как оборудования, так и исследуемого материала и, следовательно, результаты измерений могут стать не репрезентативными. В этой связи, целью данной работы является численное исследование теплообмена с использованием математической модели таяния льда в условиях осуществления парникового эффекта внутри замкнутого пространства.

Постановка задачи аналогична [3] и соответствует [2]: в климатической камере с начальной температурой внутри камеры $T_{\infty}=273$ К на непрозрачной вертикальной подложке из бакелита закреплен слой льда, облучаемый искусственным источником излучения с температурой накала нити 3200 К. За счет парникового эффекта температура внутри камеры $T_{env}(t)$ начинает расти. Лед представляет собой анизотропно рассеивающий и поглощающий излучение полупрозрачный материал, содержащий пузырьки с поглощающими излучение газами. Для расчета радиационной части используется модифицированный метод средних потоков, селективность излучения моделируется тремя спектральными полосами поглощения. Для учета анизотропного рассеяния излучения использован метод транспортного приближения [3].

Решение задачи радиационно-кондуктивного теплообмена с фазовым переходом 1 рода в плоском слое льда проводится в два этапа. На первом этапе рассматривается нагрев плоского слоя льда до достижения правой облучаемой границей температуры таяния. Далее начинается второй этап – таяние льда, в процессе которого температура облучаемой поверхности постоянно равна температуре плавления и на ней выделяется тонкая пленка талой воды. Математическая модель задачи плавления льда представляет собой однофазную постановку задачи Стефана. Решение комбинированной задачи сводится к определению полей температуры и радиационных потоков, темпов роста

температуры внутри климатической камеры и необлучаемой поверхности льда, а также скорости таяния льда.

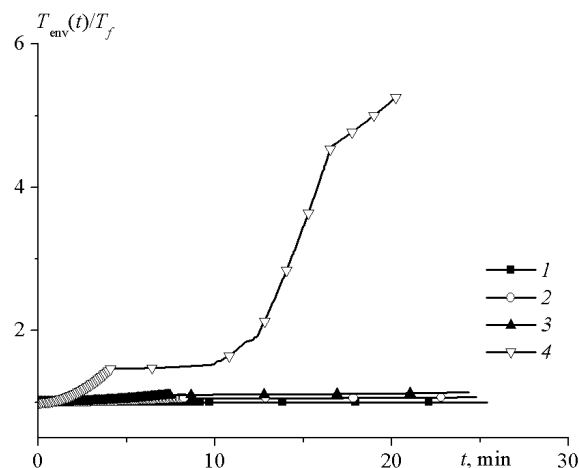


Рис. 1. Рост температуры внутри камеры T_{env} со временем при различных значениях α_{env} (1 – без поглощения, 2 – $\alpha_{env}=0,043$ м^{-1} , 3 – $\alpha_{env}=0,1$ м^{-1} , 4 – $\alpha_{env}=1,5$ м^{-1})

Проведен численный расчет нагрева и таяния слоя льда с пузырьками, состоящими из поглощающего излучение газа, с учетом поглощения излучения окружающей средой внутри климатической камеры. Показано, что температура внутри камеры при парниковом эффекте растет нелинейно. Таяние льда существенно зависит от коэффициента поглощения средой внутри камеры. По мере увеличения коэффициента поглощения конвективная составляющая теплообмена доминирует, хотя увеличение доли конвекции происходит за счет излучения. Результаты расчетов могут найти применение в оценке парникового эффекта на тепловой режим снежно-ледяных систем в различных арктических технологиях при наличии теплового источника излучения и вопросах климатологии.

Список литературы:

1. Fourier, J. B. J. Memoire sur les Temperatures du Globe Terrestre et des Espaces Planetaires. // Memoires de l'Academie Royale Des Sciences. 1827. P. 569–604.
2. Seki N., Sugawara M., Fukusaki S. Radiative Melting of Ice Layer Adhering to a Vertical Surface // Wärme- und Stoffübertragung. – Vol. 12, Iss. 2. –1979. –Pp. 137-144.
3. Sleptsov S.D., Savvinova N.A. Influence of optical properties of two-phase medium on intensity of melting of layer of cloudy ice // Journal of Engineering Thermophysics, 2025, Vol. 34, No. 1, pp. 93 – 106.
4. Savvinova N.A., Timofeev A.M., Malyshev A.V. and Sleptsov S.D. Radiation heating of ice formed on the sub-strate // IEEE Xplore, 2020, P. 1– 4.

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В ТВЕРДОМ И ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ ПРИ БЫСТРОМ НАГРЕВЕ МОЩНЫМ ИМПУЛЬСОМ ТОКА**Сенченко В.Н., Гаврильев А.Ч., Мельников С.А., Хищенко К.В.**Объединенный институт высоких температур РАН,
ул. Ижорская 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

Экспериментальное изучение термодинамических свойств материалов в условиях мощного импульсного энерговысвобождения дает возможность получить важную информацию для проверки теоретических моделей уравнений состояния в труднодоступной области при высоких температурах. Настоящая работа посвящена исследованию тугоплавких металлов (ванадия, хрома, ниобия, иридия) методом импульсного нагрева, подробно описанным ранее [1]. Этот метод заключается в быстром нагреве проводящих образцов пропусканием импульса тока длительностью от нескольких сот до десятков микросекунд. Нагрев происходит достаточно быстро, чтобы можно было пренебречь тепловыми потерями из-за теплопроводности в местах крепления образца в течение хода эксперимента, а также это позволяет проводить измерения при плавлении и в жидкой фазе, поскольку цилиндрический образец сохраняет первоначальную форму. Образец жестко закреплялся с двух концов в медных цангах. При нагреве измерялись ток, падение напряжения на

образце, температура и ширина образца. Используя полученные данные, можно найти удельную энтальпию, удельное сопротивление и коэффициент линейного расширения исследуемых материалов. Измерение расширения проводилось методом теневой фотографии высокоскоростной видеокамерой с высоким разрешением. Результаты измерений обсуждаются в сравнении с имеющимися данными других экспериментов.

Список литературы:

1. Сенченко В.Н., Беликов Р.С. Исследование высокотемпературных свойств пиролитического графита методом импульсного электрического нагрева // Известия вузов. Физика. 2018. Т. 61, № 9/2. С. 157–160.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (грант № 25-19-00944,
<https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).*

**УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПЕРИКЛАЗА И СМЕСЕЙ НА ЕГО ОСНОВЕ
ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ****Середкин Н.Н., Хищенко К.В.**Объединенный институт высоких температур РАН,
ул. Ижорская 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

В работе представлено уравнение состояния периклаза (оксида магния) и смесей на его основе для описания ударно-волновых процессов. Для каждого компонента смеси уравнение состояния задано на основе модели [1] в форме функции удельной свободной энергии (Гельмгольца) от удельного объема и температуры. Этот термодинамический потенциал представляется в виде суммы трех слагаемых, выражающих энергию вещества при абсолютном нуле температуры (холодная составляющая) и тепловые вклады ионов и электронов. Расчет термодинамических характеристик смеси при заданных значениях давления и температуры проводится исходя из условий механического и термического равновесия в компонентах, где параметры смеси определяются через массовые доли составляющих ее веществ и их уравнения состояния. Параметры ударного сжатия для исследованных веществ рассчитывались из совместного решения уравнения баланса энергии на фронте ударной волны (соотношение Гюгоньо) [2] и полученных уравнений состояния.

В рамках представленной модели были получены ударные адиабаты для смесей периклаза с другими компонентами. Сопоставление с результатами экспериментов подтверждает адекватность описания поведения материалов в исследованном диапазоне давлений и температур. Полученные зависимости позволяют определять состояние многокомпонентных сред при решении задач физики высоких плотностей энергии и могут быть внедрены в комплексы программ для гидродинамического моделирования.

Список литературы:

1. Середкин Н.Н., Хищенко К.В. Уравнение состояния сплава гафния и циркония при высоких давлениях и температурах в ударных волнах // ТВТ. 2024. Т. 62, № 4. С. 513–517.
2. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 2008.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (грант № 25-19-00944,
<https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).*

**ПРОСТЫЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ
ПРИ ВЫСОКИХ ВНУТРЕННИХ ЭНЕРГИЯХ И ЭНТРОПИЯХ****Хищенко К.В.**Объединенный институт высоких температур РАН,
ул. Ижорская 13, стр. 2, Москва, 125412, Россия

Решение задач физической гидродинамики вещества в условиях интенсивного импульсного нагружения, сопряженное с численным моделированием нестационарных теплофизических процессов, выдвигает требование адекватности расчета термодинамических характеристик различных материалов в той области параметров, которая достигается в этих процессах. Для моделирования адиабатических процессов, таких как ударное сжатие и изоэнтروпическое расширение, достаточно установить взаимосвязь давления с удельным объемом и внутренней энергией, например, в форме калорического уравнения состояния [1]. Для учета процессов теплообмена в таком случае требуется привлечение дополнительной информации, например, о температуре [2] или теплоемкости вещества [3].

В настоящей работе предлагается простая модель термодинамики металлических материалов на основе характеристической функции энтропии от переменных объема и внутренней энергии (для единицы массы вещества). В рамках этой модели давление как функция объема и внутренней энергии определяется (в близком к уравнению состояния [1] простом виде) через производные [4] предложенной характеристической функции. Для иллюстрации адекватности полученных уравнений состояния приводятся результаты

расчетов ударных адиабат и изоэнтроп разгрузки некоторых металлов (алюминий, тантал, молибден и другие) в сопоставлении с имеющимися данными из ударно-волновых экспериментов с образцами разной исходной пористости.

Разработанные уравнения состояния металлов могут быть эффективно использованы для моделирования теплофизических и гидродинамических процессов при высоких удельных внутренних энергиях и энтропиях.

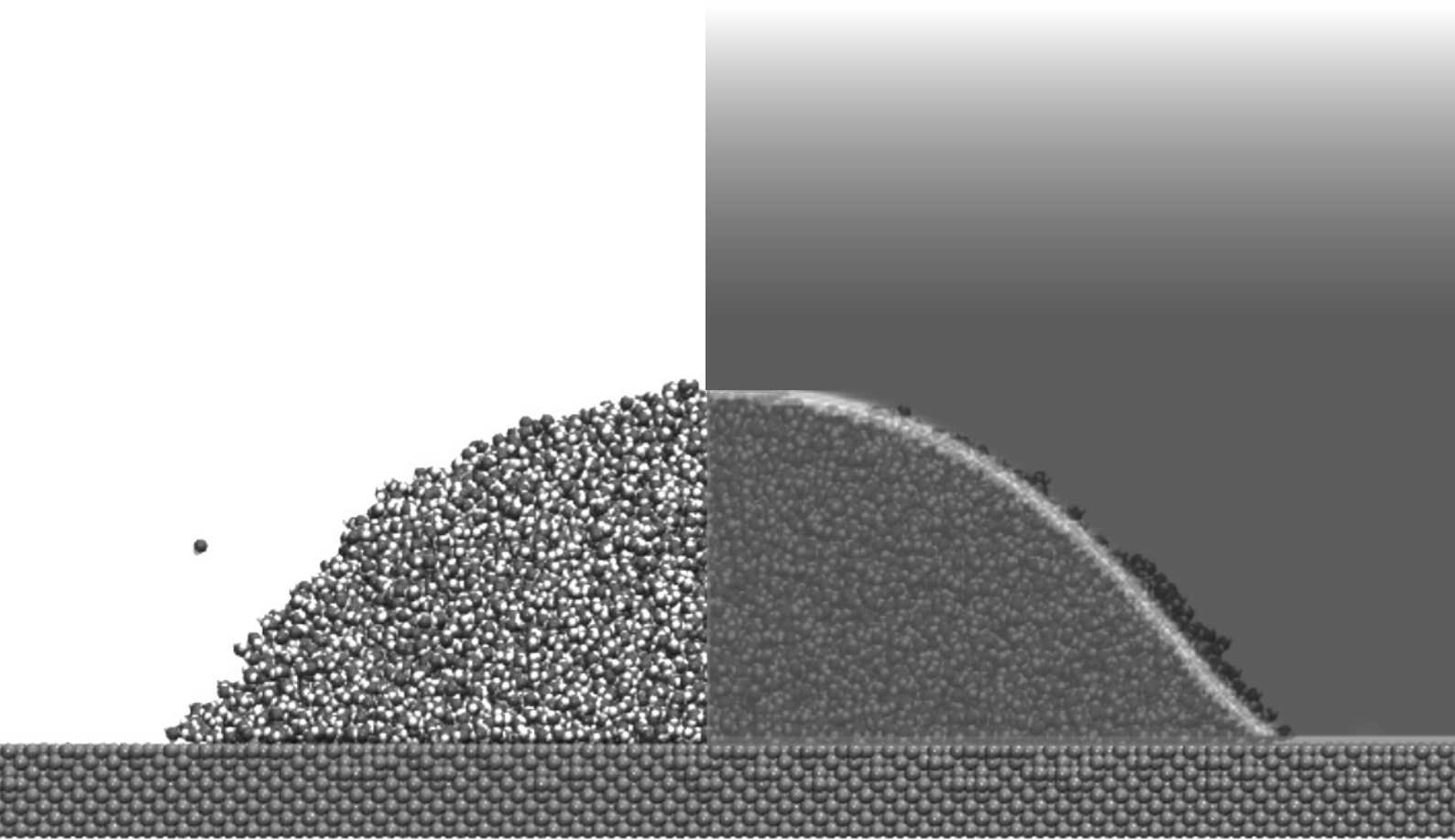
Список литературы:

1. Хищенко К.В. Уравнение состояния алюминия при высоких давлениях // ТВТ. 2023. Т. 61, № 3. С. 477–480.
2. Николаев Д.Н., Пялигин А.А., Хищенко К.В., Терновой В.Я., Фортов В.Е. Термодинамические свойства бромформа при высоких давлениях // Хим. физика. 2000. Т. 19, № 10. С. 98–108.
3. Khishchenko K.V., Boyarskikh K.A., Obruchkova L.R., Seredkin N.N. Equation of state for aluminum at high entropies and internal energies in shock waves // Metals. 2025. V. 15, № 11. P. 1189.
4. Базаров И.П. Термодинамика. М.: Высшая школа, 1991.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (грант № 25-19-00944,
<https://rscf.ru/project/25-19-00944/>).*

СЕКЦИЯ 5

Тепломассообмен и гидродинамика
на микро- и наномасштабах,
процессы в разреженных газах и плазме



УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИКОЙ ФОРМИРОВАНИЯ АЛЬГИНАТНЫХ МИКРОКАПСУЛ В ЧИПАХ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ПРЕКЕРАМИЧЕСКИМИ ПОЛИМЕРАМИ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ СТЕНОК МИКРОКАНАЛОВ

Ашихмин А.Е.^{1,2}, Булатова Е.В.¹, Пискунова А.Е.^{1,2}, Пискунов М.В.^{1,2}

¹ Сургутский государственный университет, пр. Ленина 1, Сургут, 628412, Россия

² Томский политехнический университет, пр. Ленина 30, Томск, 634050, Россия

Технология капельной микрофлюидики позволяет получать микрокапсулы из растворов биополимеров, среди которых наиболее распространенным является альгинат натрия. Процесс производства альгинатных микрокапсул разделяется на два этапа: формирование эмульсии водного раствора биополимера в масляной фазе и последующее гелеобразование.

В процессе гелеобразования чипы страдают от последствий сложных химических и микротехнологических процессов. Поэтому помимо гидрофобности, стенки микроканалов должны быть стойкими к воздействию химических реакций гелеобразования.

В отличие от традиционных органических покрытий, прекерамические полимеры на основе кремнийорганических соединений формируют плотную неорганическую матрицу (Si-O, Si-N или Si-C), обладающую исключительной адгезией к фотополимерным смолам за счет взаимодействия с остаточными гидроксильными группами на поверхности 3D-печатного чипа.

Данная работа сконцентрирована на определении ключевых характеристик качества покрытия (статический и динамический краевой угол смачивания, элементный состав покрытия) на основе прекерамических полимеров для микрофлюидных чипов, изготовленных из фотополимерных смол. Экспериментально проанализированы три основных метода нанесения покрытия: испарение состава вследствие естественной конвекции при комнатной температуре (Метод 1); испарение состава в печи при температурах от 40 до 60 °С (Метод 2); испарение состава в ультрафиолетовой камере при комнатной температуре (Метод 3).

Анализ элементного состава образцов без покрытия и с покрытием проводился методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) с использованием энергодисперсионного спектрометра EDX-8000 (Shimadzu) под вакуумом 8-12 Па (напряжение 15 / 50 кВ). Измерение свойств смачивания поверхности проводилось на приборе Kruss DSA25. Краевой угол смачивания (θ) определялся методом лежащей капли (метод подбора кривой Янга-Лапласа). Для измерения динамического краевого угла смачивания использовался метод изменения объема капли с тангенциальным методом подбора кривой. В условиях микроканального чипа разница между наступающим и отступающим углом (гистерезис $\Delta\theta$) поверхности стенок микроканала определяет гидродинамику формирования альгинатных микросфер.

Анализ стойкости покрытия проводился модифицированным методом истираемости. Для этого фиксировался θ после каждого цикла механического воздействия на образец (N). Образец прижимался к поверхности с абразивом (кварцевый песок) с силой, равной 1 Н. Один цикл механического воздействия по данной

методике по оценкам соответствовал 8 часам непрерывной работы (1 рабочий день) микрофлюидного чипа (т.е. формирования альгинатных микрокапсул). Динамика изменения θ и гистерезиса $\Delta\theta$ после циклического механического воздействия на образец (N) представлена на рисунке 1.

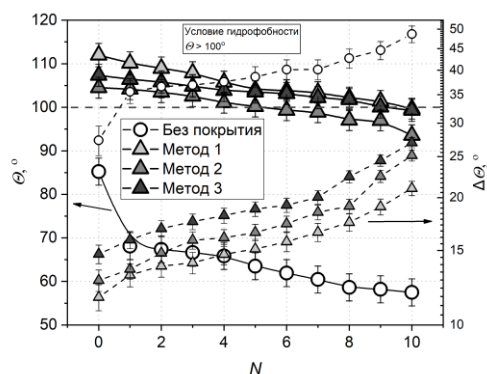


Рис. 1 - Изменение краевого угла смачивания (θ) и гистерезиса ($\Delta\theta$) в зависимости от количества циклов механического воздействия на образец (N)

При применении методов 1 и 3 достигается наиболее высокий показатель стойкости гидрофобного покрытия к истиранию, поскольку после 9 циклов механического воздействия сохраняется $\theta > 100^\circ$.

Используя изготовленный на 3D принтере микрофлюидный чип с нанесенным по методу 1 покрытием, успешно сформированы микрокапсулы размером 200-350 мкм (рисунок 2) и выявлены режимы двухфазного течения, а также механизм отрыва капель.

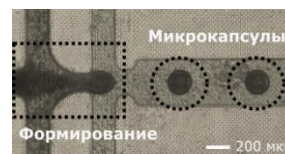


Рис. 2 - Область формирования альгинатных микрокапсул в чипе.

По результатам исследования экспериментально разработан метод нанесения гидрофобного покрытия на основе прекерамических полимеров и метод оценки стойкости гидрофобного покрытия. Определены ключевые характеристики смачиваемости и стойкости гидрофобного покрытия в условиях формирования альгинатных микрокапсул.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Департамента образования и науки Ханты-Мансийского автономного округа — Югры (тема № 2023-578-05, «Разработка методов капельной микрогидродинамики для высокоточного производства лекарственных форм в ХМАО»).

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПИНОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА В МИКРОКАНАЛАХ

Биккинина Н.Б., Солнышкина О.А.

Уфимский университет науки и технологий,
ул. З. Валиди, 32, Уфа, 450076, Россия

Создание эффективных мини- и микромасштабных систем охлаждения невозможно без детального изучения гидродинамических процессов, протекающих в них. Ключевую роль играет внутренняя структура микроканалов, по которым движется теплоноситель: она должна обеспечивать максимальную площадь теплообмена и при этом минимизировать гидравлические потери при прокачке жидкости. Особенно перспективным направлением считается применение микротеплообменников, состоящих из множества микромасштабных каналов с пинами различной конфигурации [1, 2]. В рамках данного исследования решается задача подбора оптимальной формы и пространственного распределения пинов для достижения наиболее эффективного отвода тепла от стенок микроканала при минимально возможном расходе теплоносителя.

В рамках настоящего исследования выполнено численное моделирование течения жидкости при температуре 25°C в микроканалах высотой 50 мкм, содержащих массив пинов. Рассматривается стационарная задача конвективного теплообмена в микроканале со следующими граничными условиями. На нижней грани микроканала и поверхности пинов задан постоянный тепловой поток, а также задан перепад давления между входом и выходом. На твердых стенках (стенки канала и поверхности пинов) применено условие прилипания, а на боковых гранях микроканала применены периодические условия для скорости и температуры. С помощью программного комплекса для вычислительной гидродинамики Ansys Fluent проведено параметрическое исследование эффективности процессов тепломассопереноса при различных вариантах пространственного расположения и форм поперечного сечения пинов. Достоверность результатов, полученных в данном программном комплексе, была проверена путем верификации численных данных с аналитическим решением задачи о течении вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрическом канале.

В данной модели пины были представлены в виде столбиков с каплевидным и круглым поперечным сечением, ориентированных перпендикулярно направлению потока и занимающих всю высоту микроканала. В работе реализован принцип компоновки пинов, при котором они объединяются в группы по четыре элемента. Такой подход позволяет отдельно регулировать расстояния внутри группы (Δ_{el}) и между группами (Δ_{gr}). При этом для всех вариантов конфигурации сумма этих расстояний остаётся неизменной ($\Delta_{el} + \Delta_{gr} = \text{const}$), что гарантирует постоянство коэффициента пустотности и удельной площади поверхности теплообмена. Рассматривались конфигурации с

равномерным распределением столбиков и с двойным масштабом упаковки пинов.

В ходе численного моделирования для каждой из рассматриваемых конфигураций микроканалов оценивались изменения объёмного расхода жидкости (Q) и коэффициента гидравлических потерь на трение (f). На основе интегрального теплового баланса определялись средний коэффициент теплоотдачи, среднее число Нуссельта (Nu) и общий показатель эффективности (PEC). Кроме того, были рассчитаны поля продольных и поперечных компонент скорости, а также температурное поле в средней плоскости микроканала xOy. Анализ показал, что с ростом перепада давления и увеличением объёмного расхода существенно изменяется температурное поле: усиливается конвективный перенос и повышается эффективность теплоотвода в конфигурациях с более развитой структурой потока.

Результаты численного исследования демонстрируют, что при неизменной удельной площади поверхности теплообмена и пустотности микроканала изменение его внутренней структуры за счет варьирования формы и упаковки пинов оказывает заметное влияние на структуру течения и интенсивность теплообмена. Установлены пороговые значения перепада давления, при которых прирост теплообмена недостаточен по сравнению с ростом сопротивления для всех модификаций микроканалов. Принимая во внимание совокупность всех факторов, влияющих на эффективность микротеплообменника, сделан вывод о том, какие конфигурации микроканалов являются наиболее перспективными для эффективного теплообмена и каковы ограничения в гидродинамических параметрах для данных случаев. Полученные результаты будут использованы в экспериментальных работах для модификации внутренней геометрии микротеплообменников с учетом технических возможностей производства таких устройств.

Список литературы:

1. Фаткуллина Н. Б., Курбанова С. С., Солнышкина О. А. Влияние пространственного распределения элементов внутренней структуры микроканала на гидродинамические характеристики потока жидкости // Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50, № 23. С. 46–49.
2. Bikkinina N., Bulatova A., Solnyshkina O. Impact of Spatial Configuration on Fluid Flow through a Microchannel with Fin Pin Array // Journal of Applied and Computational Mechanics. 2026. V. 12, N. 1. P. 164–175.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда № 24-19-00697,
<https://rscf.ru/project/24-19-00697/>.*

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИИ ВЫСОТЫ ПИНОВ НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В МИКРОТЕПЛООБМЕННИКАХ

Булатова А.З., Солнышкина О.А.

Уфимский университет науки и технологий,
ул. 3. Валиди 32, Уфа, 450076, Россия

За последние годы технологии интеграции электронных компонентов постоянно совершенствуются. Такая тенденция обусловлена постоянным ростом скоростей обработки и передачи данных, а также тенденцией к созданию более компактных и высокоинтегрированных электронных устройств. В то же время увеличивается плотность тепловой нагрузки, поэтому разработка инновационных методов отвода тепла остается актуальной задачей для обеспечения надежности и долговечности устройств. Интеграция микрожидкостных систем охлаждения непосредственно в структуру микросхем является весьма перспективным направлением управления тепловым режимом, поскольку такие системы применимы для охлаждения интегральных схем, микроэлектромеханических систем (МЭМС), радиочастотных устройств и биомедицинских имплантатов.

Миниатюризация элементов теплоотвода повышает отношение площади поверхности к объему, что способствует интенсификации теплообмена. Вместе с тем это приводит к росту гидравлического сопротивления и усложняет технологию изготовления. Эффективность теплоотвода и характеристики течения рабочей жидкости в микроканалах существенно зависят от геометрии и пространственной конфигурации элементов микроструктуры канала.

В последние годы всё больше привлекает внимание концепция микроканалов открытого типа, которая впервые предложена в работе [1]. В таких микроканалах высота столбиков (пинов) меньше высоты основного канала, в результате чего между вершинами столбиков и верхней стенкой (крышкой) микроканала образуется открытое пространство (зазор), заполненное рабочей жидкостью (вода). Наличие этого зазора снижает сопротивление потоку, увеличивает плотность центров зарождения при кипении и подавляет нестабильность фазового перехода. В совокупности эти эффекты, как правило, приводят к усилению теплоотдачи при одновременном уменьшении перепада давления [2].

В данной работе проведено численное исследование гидродинамики и процессов теплопереноса в микроканале открытого типа с цилиндрическими элементами внутренней структуры радиусом $R = 25$ мкм. Варьировалась высота пинов (от 50% до 100% от общей высоты канала), а также их пространственное расположение друг от друга ($\Delta = 20, 25, 30, 35$ мкм). В расчетах использовалась коммерческая программа Ansys Fluent. В результате получены поля продольной, поперечной и вертикальной компонент скорости в различных плоскостях, а также профили этих компонент в различных осевых сечениях. На рис. 1 приведен профиль продольной U_x компоненты скорости в осевом сечении (Oz) микроканала с равномерным распределением пинов высотой 25 мкм (50% от

общей высоты канала) для различных значений их пространственного распределения Δ . Анализ результатов показал, что уменьшение высоты пинов увеличивает зазор между верхней частью столбиков и верхней стенкой канала, что приводит к росту не только продольной компоненты скорости U_x , но и поперечных компонент U_y и U_z .

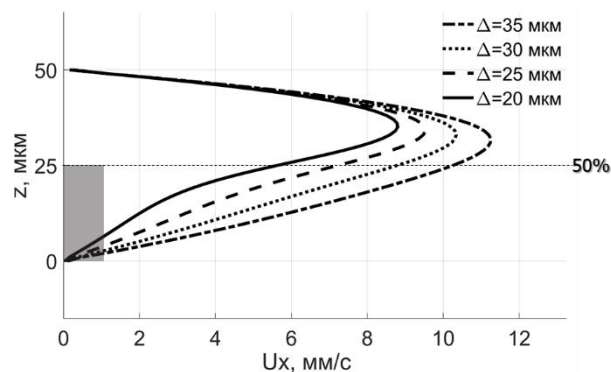


Рис. 1. Профили продольной U_x компонент скорости в осевом сечении микроканала с равномерным распределением пинов высотой 25 мкм для $\Delta = 20, 25, 30, 35$ мкм.

В рамках расчетов были получены поля распределения температуры жидкости в канале, зависимости расхода жидкости (Q), коэффициента гидравлических потерь на трение (f). На основе интегрального теплового баланса определялся средний коэффициент теплоотдачи, после чего рассчитывалось число Нуссельта (Nu) через соотношение с характерным размером канала. В качестве итоговой метрики использовался показатель эффективности (РЕС), отражающий соотношение между интенсивностью теплоотдачи и гидравлическими потерями. Полученные зависимости позволяют сравнивать различные конфигурации микроструктуры канала и выбрать оптимальные геометрические параметры. Представленные результаты позволяют более детально исследовать процессы теплопереноса в микроканалах открытого типа и могут быть использованы при разработке более эффективных систем охлаждения для миниатюрных электронных устройств.

Список литературы:

1. Cooke D., Kandlikar S. G. Effect of open microchannel geometry on pool boiling enhancement // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Т. 55. – №. 4. – С. 1004-1013.
2. Bhandari P., Prajapati Y. K. Thermal performance of open microchannel heat sink with variable pin fin height // International journal of thermal sciences. – 2021. – Т. 159. – С. 106609.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда № 24-19-00697,
<https://rscf.ru/project/24-19-00697/>*

ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ В ПЛОСКИХ МИКРОКАНАЛАХ

Зорькина А.И., Роньшин Ф.В.

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

Стремительное развитие электроники, а также тенденции к её миниатюризации привели к возникновению таких высоких тепловых потоков, что отвод тепла стал актуальной задачей в сфере безопасности и надежности электронных систем. Фазовый переход (кипение) в микроканалах является перспективным методом охлаждения устройств с интенсивным локальным тепловыделением. Охлаждающую жидкость (диэлектрическую, совместимую с электроникой) можно непосредственно подводить к тепловыделяющей поверхности микрочипа. Это позволяет эффективно рассеивать тепло и предотвращать высокие перегревы поверхности, обеспечивая стабильную и безопасную работу электронного устройства [1]. Серьезной проблемой для работы такой двухфазной системы охлаждения является гистерезис при кипении, наиболее выраженный в кремниевых микроканалах. Поскольку кремний является ключевым материалом, на основе которого разрабатывается подавляющее число интегральных схем, данное явление требует к себе особого внимания. Гистерезис при кипении проявляется в более «позднем» начале кипения (кипение начинается при значительных перегревах поверхности). Когда же кипение начинается, процесс сопровождается резким снижением температуры стенки и повышением давления в системе, вследствие резкого увеличения объемной доли пара в микроканале (одновременно активируется множество центров парообразования). Описываемое явление требует детального исследования и учета при проектировании высокоэффективных систем охлаждения. Необходимо детально исследовать методы подавления гистерезиса, в частности применение наноразмерных модификаций тепловыделяющей поверхности.

В работе комплексно исследован процесс кипения в плоских микроканалах на гладкой и текстурированной кремниевых поверхностях. Высота канала составила 40 мкм. Тонкопленочный ИТО нагреватель (оксид индия олова) располагался на внешней стороне кремниевой пластины, толщина которой равнялась 0.75 мм. Проведенный расчет конвективного режима теплообмена в Comsol Multiphysics показал, что более 95% тепла передается в жидкость. В качестве рабочей жидкости использовалась диэлектрическая HFE-7100. Начальная температура жидкости задавалась при помощи контура термостабилизации и термопары и составляла 25 °C для всех серий экспериментов. На входе в микроканал устанавливался датчик давления, на выходе давление поддерживалось равным атмосферному. Визуализация быстропротекающих процессов выполнена при помощи модифицированного ширен-метода и высокоскоростной камеры (частота съёмки 3000 кадров в секунду). Пример визуализации двухфазного течения представлен на рис. 1. На ри-

сунке показано начало кипения на гладкой поверхности кремния при массовой скорости $G = 510 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$. Снизу температурные поля нагревателя регистрировались инфракрасной камерой. В работе варьировались массовые скорости потока G в диапазоне от 250 до 630 $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ и тепловой поток q от 0 до 36 $\text{Вт}/\text{см}^2$.

Для сегментации паровых пузырей использовалась архитектура нейронной сети U-Net. Обученная модель позволила с высокой точностью определять диаметр паровых пузырей и отслеживать динамику их роста. В работе продемонстрированы характерные режимы двухфазного течения в зависимости от подводимой мощности. Пузырьковый режим наблюдается при малых тепловых потоках, пузыри формируются и растут при движении вдоль потока. Вспененный режим – активируются новые центры парообразования, и пузыри активно взаимодействуют друг с другом (рис. 1). Кольцевой режим – пар перемещается вдоль движущихся тонких пленок жидкости. Именно в кольцевом режиме наблюдается наиболее эффективный теплообмен за счет испарения тонкой пленки жидкости. Показана интенсификация теплообмена при использовании модифицированной поверхности кремния, а также подавление гистерезиса при кипении. На гладкой поверхности кремния отмечалось подавление гистерезиса при малых массовых скоростях потока (250 $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ и 380 $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$). Получены основные закономерности процесса: зависимость коэффициента теплоотдачи и давления в микроканале от плотности теплового потока и кривые кипения.

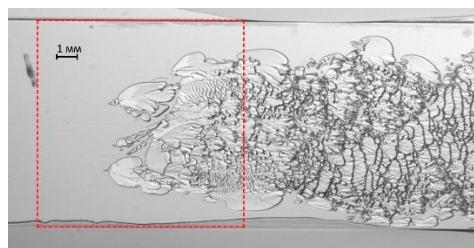


Рис. 1. Начало кипения для массовой скорости потока $G = 510 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ (гладкая поверхность кремния), поток слева направо, красным квадратом выделена зона ИТО нагревателя

Список литературы:

1. Karayiannis T., Mahmoud M. Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 115. P. 1372–1397.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2025-572.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Коваленко П.В.^{1,2}, Квасников Л.Г.^{1,2}, Орлов А.Д.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск

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

Дуговые плазматроны постоянного тока широко применяются в технологиях плазменного напыления, плазмохимического синтеза, переработки отходов и водородной энергетике [1]. Плотности мощности 10^6 – 10^7 Дж/м³ и тепловые потоки до 10^9 Вт/м² существенно затрудняют экспериментальную диагностику процессов в столбе дуги, что повышает роль численного моделирования при оптимизации режимных и конструктивных параметров.

В настоящей работе разработан программный комплекс для расчёта стационарной осесимметричной двумерной (r, z) модели дугового плазматрона в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Решается замкнутая магнитогидродинамическая система уравнений неразрывности, импульса с силой Лоренца $J \times B$, энергии в энтальпийной форме с источником джоулева нагрева σE^2 и стоком объёмного излучения Q_{rad} , а также уравнения сохранения тока $\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0$ и закон Био–Савара для самосогласованного азимутального магнитного поля. Теплофизические свойства газа (электропроводность $\sigma(T)$, теплопроводность, теплоёмкость, плотность) задаются аналитическими аппроксимациями с гауссовыми пиками на температурах диссоциации и ионизации.

Численное решение строится методом конечных объёмов на шахматной сетке Патанкара [2]. Для уравнения энергии используется степенная схема Патанкара и линеаризация источников; уравнение энергии решается алгоритмом прогонки Томаса с проходом по слоям (Line-by-Line). Для уравнений Навье–Стокса реализован алгоритм SIMPLE с прямым решением уравнения поправки давления методом разреженного LU-разложения. Параллелизм по строкам сетки достигается через JIT-компиляцию (Numba).

Базовый расчёт для аргона ($I = 200$ А, $G = 2$ г/с, $R = 10$ мм, $L = 50$ мм) даёт $T_{\text{max}} = 17\,546$ К, $V_{\text{max}} = 178$ м/с, $U_{\text{arc}} = 48,7$ В, тепловой КПД $\eta = 82,6$ %.

Серия параметрических расчётов в аргоне для токов $I = 100, 200, 300, 400$ А (при фиксированных G и d) аппроксимирована степенным законом

$$U_{\text{arc}}(I) = A \cdot I^k, \quad (1)$$

с коэффициентами $A = 10,30$ В, $k = 0,289$ ($R^2 = 0,99$). Полученное значение показателя степени k попадает точно в диапазон 0,2–0,4, характерный для критерияльной зависимости тепловых характеристик линейных дуговых плазматронов согласно обобщению М. Ф. Жукова [3]. Это рассматривается как ключевой верификационный результат: интегральные характери-

стики дуги в построенной модели воспроизводят универсальные масштабные законы плазменной дугомеханики.

Сравнение полей температуры в столбе дуги с экспериментальными данными для аргона ($I = 200$ А) [4] показало согласие с относительной погрешностью $\text{NRMSE} \approx 10$ % для осевых профилей $T(z)$ и 12–15 % для радиальных $T(r)$. Систематическое завышение центральной температуры на 15–20 % обусловлено приближением оптически прозрачной плазмы и устраняется внедрением метода чистого излучения (NEC) с табличными данными [5].

В базовую модель добавлен учёт объёмного излучения через метод чистого излучения (NEC, Net Emission Coefficient) с использованием таблиц Cressault & Rouffet (2010) для аргона при 1 атм. Зависимость $\varepsilon_N(T, R_p)$ интерполируется и включена в уравнение энергии как объёмный сток. Пересчёт для базы (Ar, 200 А) показал увеличение T_{max} на ~1000 К и смещение КПД на 1,5 п.п. вверх — что согласуется с оценками [Gleizes et al., 1991]. При этом качественная картина течения и формы дуги сохраняется, степенной закон $U_{\text{arc}}(I)$ остаётся в пределах погрешности.

Осуществлен переход на табличные значения свойств газа и внедрение турбулентности. Дальнейший шаг — двухтемпературная (2LTE) модель.

Список литературы:

1. Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. Электродуговые генераторы термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.
2. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Taylor & Francis, 1980. 197 p.
3. Радько С.И., Урбах Э.К. Устройство электродугового плазматрона и моделирование его энергетических характеристик // Доклады ТУСУР. 2012. № 1 (25), часть 1. С. 212–215.
4. Дресвин С.В., Нгуен Куок Ши, Иванов Д.В. Основы математического моделирования плазматронов. Ч. 3. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.
5. Cressault Y., Rouffet M.E. Net emission of Ar–H₂–He thermal plasmas at atmospheric pressure // Journal of Physics D: Applied Physics. 2010. Vol. 43. Article 335204.
6. Gleizes A., Gonzalez J.J., Liani B. Calculation of net emission coefficient in Ar–Cu mixtures // Journal of Physics D: Applied Physics. 1991. Vol. 24, No. 8. P. 1300–1304.
7. Murphy A.B., Arundell C.J. Transport coefficients of argon, nitrogen, oxygen, argon-nitrogen and argon-oxygen plasmas // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 1994. Vol. 14, No. 4. P. 451–490.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2025-572).

ЭНЕРГООБМЕН И МАССОПЕРЕНОС ПРИ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ АРГОНА

Коробейщиков Н.Г.¹, Николаев И.В.¹

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

Самоорганизованное наноструктурирование материалов с помощью ионной бомбардировки, как один из перспективных методов поверхностной инженерии, привлекает заметное внимание из-за большого потенциала практического применения [1, 2]. По сравнению с традиционными атомарными пучками, газоструйные ионно-кластерные пучки обладают определенными преимуществами, такими как высокая эффективность и универсальность обработки [3, 4].

В докладе приведены результаты численного МД-моделирования взаимодействия ускоренных кластеров аргона с поверхностью Ge и Si. Использовались монокристаллические мишени с ориентацией [100] и размерами $40 \times 40 \times 30$ элементарных ячеек, что соответствует 384'000 атомам. Кластеры имели фиксированный размер $N = 923$ атом/кластер ("магический номер" икосаэдральной микроструктуры кластера) и кинетическую энергию $E_0 = 10$ кэВ. Угол падения θ варьировался в диапазоне от 0° до 75° , что соответствует различным локальным углам столкновений кластеров с шероховатой поверхностью материала в реальных условиях.

Степень воздействия кластеров на обрабатываемый материал определяется динамикой передачи мишени кинетической энергии падающих кластеров E_0 , которая перераспределяется между мишенью Etarget, рассеянными атомами кластера Escat и распыленными атомами мишени Espot. На рис. 1 приведены зависимости указанных величин от угла падения кластеров на поверхность мишени. При всех углах падения переданная мишени энергия Etarget для Si всегда больше, чем для Ge, что объясняется более глубоким ударным кратером. Соответственно, энергия рассеянных атомов кластера и энергия распыленных атомов мишени у Ge выше.

При нормальном и малых наклонных (менее 30°) углах падения основная часть 80-90% исходной энергии кластера передается мишени. Низкая удельная энергия частиц кластера $E/N \sim 10$ эВ приводит к высокой плотности выделения энергии в области удара [5, 6]. Переданная мишени энергия Etarget расходуется на формирование ударного кратера, перемещение приповерхностных атомов мишени, и сопутствующие диссипативные процессы: ударные волны, упругие колебания кристаллической решетки и др. Энергия, уносимая рассеянными атомами кластера, монотонно возрастает с увеличением угла падения и достигает 90% при скользящих углах падения. Полная кинетическая

энергия распыленных атомов мишени имеет локальный максимум при 30-40 градусах, что коррелирует с количеством данных атомов.

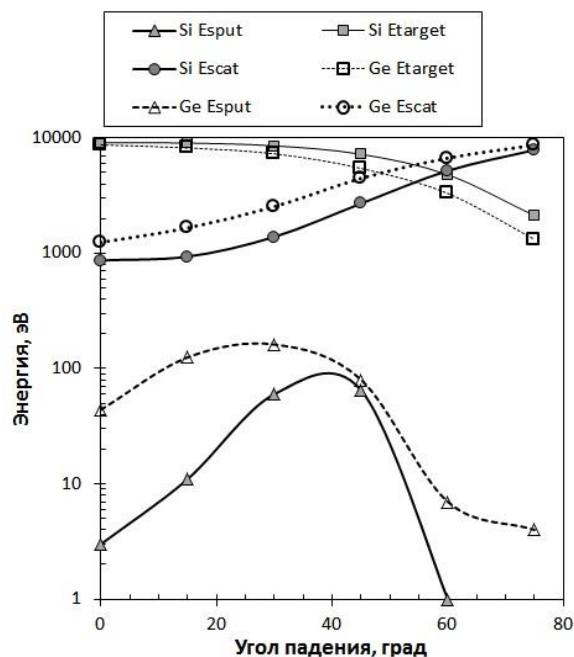


Рис. 1 – Перераспределение кинетической энергии кластеров, падающих на поверхность Si и Ge под разными углами.

Список литературы:

1. Li P., Chen S., et al. Recent advances in focused ion beam nanofabrication for nanostructures and devices: Fundamentals and applications // *Nanoscale*. 2021. V. 13(3). P. 1529-1565.
2. Liu Y., Li H., Wang C., Yang G., Frost F., Hong Y. Ordering enhancement of ion bombardment-induced nanoripples patterns: A review // *Nanomaterials*. 2025. V.15. 438.
3. Иешкин А.Е., Толстогузов А.Б., Коробейщиков Н.Г., Пеленович В.О., Черныш В.С. Газодинамические источники кластерных ионов для решения фундаментальных и прикладных задач // *УФН*. 2022. Т.192. С. 563-582.
4. Toyoda N., Tilakaratne B., Saleem I., Chu W.-K. Cluster beams, nano-ripples, and bio applications // *Appl. Phys. Rev.* 2019. V.6. 020901.
5. Popok V.N., Barke I., Campbell E.E.B., Meiwes-Broer K.-H. Cluster-surface interaction: From soft landing to implantation // *Surf. Sci. Rep.* 2011. V. 66. P. 347-377.
6. Nikolaev I.V., Stishenko P.V., Korobeishchikov N.G., Tolstoguzov A.B. Morphological and energetic characterization of argon cluster impacts on Si and Ge single crystals using MD simulation // *Coatings*. 2026. V. 16. 411.

Работа поддержана РФФ
(грант № 23-79-10061-П,
<https://rscf.ru/project/23-79-10061-П/>).

ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ЗАЗОРА МЕЖДУ ЭКРАНАМИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

Ненарокомов А.В., Зинкевич В.П.

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

Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) нашла широкое распространение в космической технике благодаря своей эффективности при достаточно малой массе. [1] Однако, поскольку ЭВТИ имеет многослойную конструкцию и не сохраняет жесткой формы, анализ ее тепловых характеристик является сложной задачей. Например, плотность укладки отражающих экранов в пакете теплоизоляции существенно влияет на величину теплового потока через пакет.

Традиционно считается, что тепловой поток через пакет возрастает за счет изменения кондуктивной составляющей теплового потока при увеличении плотности укладки, а, следовательно, при уменьшении ширины зазора между экранами. При этом не учитывается, что при достижении достаточно малой ширины зазора начинает возникать тепловой поток в ближнем поле за счет взаимодействия неоднородных электромагнитных (ЭМ) волн, который также вносит вклад в увеличение теплового потока между телами даже без их физического контакта. [2] Чтобы учесть данное явление на этапе проектирования и при анализе результатов тепловых испытаний необходимо создание уточненной математической модели.

В этом случае лучистый тепловой поток между экранами ЭВТИ необходимо рассматривать как сумму лучистого теплового потока от бегущих ЭМ волн (по закону Стефана-Больцмана) $q_{i,i+1}^{бв}$ и лучистого теплового потока от взаимодействия неоднородных ЭМ волн $q_{i,i+1}^{нв}$:

$$q = q_{i,i+1}^{бв} + q_{i,i+1}^{нв},$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ – номер экрана,

Таким образом, можно дополнить традиционную математическую модель лучистого теплового потока через ЭВТИ с числом экранов N , которая примет вид:

$$q = \varepsilon_{np} \sigma_0 (T_i^4 - T_{i+1}^4) + A(T_i^{3.5} - T_{i+1}^{3.5})$$

$$q = q_{внеш} - \varepsilon_1 \sigma_0 T_1^4$$

$$q = \varepsilon_{npN,k} \sigma_0 (T_N^4 - T_k^4),$$

где $q_{внеш}$ – внешний тепловой поток, падающий на наружный экран ($i = 1$), ε_{np} – приведенная степень черноты между двумя экранами, σ_0 – константа Стефана-Больцмана, $\varepsilon_{npN,k}$ – приведенная степень черноты между внутренним экраном ($i = N$) и конструкцией, T_N и T_k – температуры внутреннего экрана и конструкции соответственно, A – коэффициент, учитывающий изменение величины теплового потока в ближнем поле в зависимости от ширины зазора между телами. [3]

При этом с уменьшением ширины зазора между телами тепловой поток между ними возрастает, что приводит к снижению изоляционных свойств ЭВТИ.

Для проверки представленной теории были проведены тепловые испытания двух образцов. Первый образец – пара экранов ЭВТИ из алюминиевой фольги с шириной зазора 42 мкм между ними, второй образец – аналогичная пара экранов с шириной зазора вдвое больше (84 мкм). Результаты испытаний (см. рис. 1) демонстрируют возникающую разницу температур в образцах с различной шириной зазора, что может свидетельствовать о действительном влиянии данного фактора на тепловые характеристики ЭВТИ (образец №2 с большим зазором демонстрирует более высокие теплоизоляционные свойства, что соответствует ожиданиям).

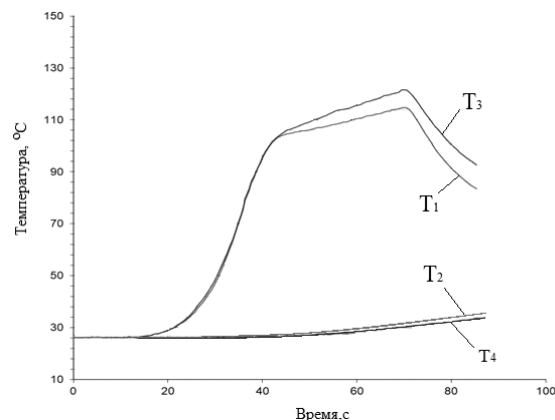


Рис. 1. Зависимость температуры образцов от времени при монотонном нагреве (10-30 с), постоянной температуре нагревателя (30-70 с) и после его выключения (после 70 с). T_1 – температура внутреннего по отношению к нагревателю экрана образца №1; T_2 – температура внешнего экрана образца №1; T_3 – температура внутреннего экрана образца №2; T_4 – температура внешнего образца №2.

В связи с этими результатами, продолжение работы над уточненной математической моделью и адаптация ее под дальнейшее практическое применение целесообразны. Уточненная математическая модель позволит прогнозировать тепловые потери через ЭВТИ на этапе проектирования до проведения тепловакуумной обработки изделия, что в дальнейшем снизит объемы и стоимость испытаний.

Список литературы:

1. Тепловой режим космических аппаратов / Малоземов В.В. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.
2. Введение в нанотеплофизику / Дмитриев А.С. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019. 790 с.
3. Зинкевич В.П., Ненарокомов А.В. Моделирование теплового потока в экранно-вакуумной теплоизоляции с применением уточненной математической модели // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 10. С. 447-454.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSFF-2023-0007).

КАПИЛЛЯРНОЕ МИКРОКАПСУЛИРОВАНИЕ ВОДНО-СПИРТОВОГО ЭКСТРАКТА ТИМЬЯНА В МИКРОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМАХ С ФОКУСИРОВКОЙ ПОТОКА**Пискунов М.В.^{1,2}, Ашихмин А.Е.², Пискунова А.Е.^{1,2}, Петрова Ю.Ю.², Булатова Е.В.², Зеленцов Д.О.²**¹ Томский политехнический университет,
пр. Ленина 30, Томск, 634050, Россия² Сургутский государственный университет,
пр. Ленина 1, Сургут, 628412, Россия

Экспериментальное исследование посвящено разработке доступного технологического метода микродозирования водно-спиртовых экстрактов тимьяна обыкновенного с высоким содержанием биоактивных соединений в сшитые внутренне и внешне оболочки альгината натрия пассивным методом капельной микрофлюидики с использованием самостоятельно изготовленного микрофлюидного чипа для двойных эмульсий с фокусировкой потока.

Микрофлюидный чип изготовлен из фотополимерной смолы CADworks3D Clear microfluidic resin на DLP 3D принтере Profluidics 285D (CADworks3D, Канада). Для формирования микрокапель «вода-в-масле» в чипе исключалось смачивание стенок микроканалов дисперсной фазой за счет покрытия их поверхности гидрофобными прекерамическими слоями. Характеристики смачивания поверхности изучены с помощью гониометра Kruss DSA25 при комнатных условиях. Статический контактный угол измерен методом лежащей капли на основе уравнения Юнга-Лапласа. Измерение динамического контактного угла выполнено методом иглы с тангенциальным методом подбора кривой. Поверхностная энергия определялась методом OWRK. Профильная шероховатость поверхности микроканалов оценена по полученным изображениям сканирующей электронной микроскопии с помощью предустановленных плагинов в ПО ImageJ.

Для формирования микрокапель используются три фазы: желатиновая, альгинатная и масляная. Желатиновая фаза представляет смесь водного раствора желатина с массовой концентрацией желатина 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 масс% и водно-спиртового экстракта тимьяна обыкновенного с концентрацией этанола 40 %. При этом, объемное соотношение водного раствора желатина к водно-спиртовому экстракту тимьяна в желатиновой фазе составляет 100/0; 95/5; 90/10 и 80/20. Альгинатная фаза представлена водным раствором альгината натрия с массовой концентрацией альгината 0,6 масс%, насыщенного карбонатом кальция. Масляная фаза состоит из растительного подсолнечного масла и поверхностно-активного вещества (ПАВ) Полисорбат 80. Объемное соотношение масла к ПАВ в этой фазе составляет 99,5/0,5. С помощью метода ротационной вискозиметрии выполнено измерение динамической вязкости с учетом варьирования сдвигового напряжения. Измерение поверхностного натяжения жидкостей на границе раздела "жидкость-воздух" проводилось с применением метода пластины Вильгельми на силовом тензиометре. Плотность жидких растворов определялась пикнометрическим методом.

Экспериментальный стенд для микрофлюидного микрокапсулирования включает высокоточный мик-

рофлюидный насос без пульсаций, приводимый в действие перепадом давлением, и высокоскоростной микроскоп с системой подсветки для видеорегистрации и визуализации процесса формирования микрокапель. Для формирования гелеобразных оболочек микрокапсул в исследовании реализован механизм ионного сшивания биополимеров - химической связи, которая образуется между противоположно заряженными ионами. Одновременно применено два подхода к сшиванию: внутренний (оболочка формируется изнутри капли) и внешний (гелеобразование происходит на границе раздела капли с непрерывной средой). Содержание биологически-активных соединений при оценке кинетики их высвобождения из микрокапсул измеряли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с УФ-детектированием.

Результаты исследования транспортных процессов при межфазном массопереносе в процессе микрофлюидного формирования микрокапель включают следующее. Установлены эффекты концентрации желатина в растворе и соотношения раствора желатина к экстракту тимьяна на такие параметры двухфазного потока как размер и скорость микрокапель, а также расстояние между ними. Также показано влияние наличия ПАВ в масляной фазе на эти параметры. Выявлены режимы течения многофазной жидкости - рядный и капельный, а также показаны границы перехода между ними в зависимости от начальных параметров течения и свойств исходных жидкостей. Представлено физическое описание механизма сдавливания двухфазной жидкости при формировании микрокапель в заданной геометрии чипа. Этот механизм обусловлен тем, что межфазные силы преобладают над вязкой диссипацией при незначительном влиянии инерции. При этом, значения диаметра формируемых микрокапель надежно масштабируются с использованием числа капиллярности для непрерывной фазы. Подтверждена эффективность высокоточного метода нанодозирования биологически активных соединений в микрокапсулы. После отделения от реагента, в который они попадают вне чипа, их можно доставить в конечную форму для приема внутрь (желатиновые капсулы или суспензии). За счет нанодозирования биоактивных соединений в каждую микрокапсулу появляется возможность высокоточного расчета дозы в конечной форме.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Департамента образования и науки Ханты-Мансийского автономного округа — Югры (тема № 2023-578-05, «Разработка методов капельной микрогидродинамики для высокоточного производства лекарственных форм в ХМАО»).

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАННИХ СТАДИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТОЗВЕЗД

Рыбакин Б.П.^{1,2}¹ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Двойные и кратные звёздные системы распространены среди звёзд главной последовательности. В последнее время получена информация о том, что фрагментация протоядер, которая происходит во время коллапса ядер, является наиболее вероятной причиной образования двойных звёзд. Такая гипотеза подтверждается результатами моделирования, проведенными с использованием трёхмерных гравитационно-гидродинамических кодов. В данной работе описаны основные процессы образования протозвезд в плотных молекулярных облаках (МО), которые формируются в результате динамических воздействий на МО. Так, в результате падения сверхзвуковой ударной волны на МО или их соударения в месте соударения формируется плотная линзообразная структура, в которую на большой скорости втекает вещество из соударяющихся молекулярных облаков. Молекулярные облака представляют собой холодные (~ 10 K), достаточно плотные по сравнению с межзвездной средой (МЗС) ($> 10^2$ г/см³) образования межзвездной среды. Молекулярные облака находятся в межзвездной среде находясь с ней в термодинамическом равновесии и движутся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями. Физические размеры расчетной области составляют $10 \times 10 \times 10$ парсек. В таких плотных линзообразных структурах образуются ядра, которые являются зародышами будущих звезд. Сформировавшиеся предзвездные ядра активно соударяются друг с другом. Такие соударения регулярно происходят в турбулентной среде за все время жизни ядер, которое равно $t = (3\pi/32G\rho)^{1/2}$. На Рис. 1 приведено поле скоростей, сформировавшееся на момент времени $t = 1.995$ млн. лет. На Рис. 2 представлены сверхплотные ядра, сформировавшиеся на момент времени $t = 1.5$ млн. лет. Возникающие турбулентные движения газа становятся главным фактором образования и дальнейшего развития плотных газовых ядер (Рис. 1.), то есть областей со значительно повышенной плотностью. При этом возникают и эволюционируют гравитационно связанные системы. В части таких систем масса превышает массу Джинса, что может привести к коллапсу и формированию новых звезд. Оставшееся вещество после формирования образовавшихся ядер, а также остатки молекулярных облаков рассеиваются в межзвездной среде. Если облака обладают достаточной массой (порядка нескольких масс Солнца и больше) и размерами и соударяются с большими скоростями, тогда сформировавшийся ударный слой просуществует время, достаточное для образования сверхплотных областей, которые могут сколлапсировать в новую звезду. При этом, в области контакта образуются плотные зоны, в которых динамически меняется плотность и сама структура этой зоны. На

На Рис. 3 приведены результаты моделирования не осевого соударения двух сверхплотных ядер, со скоростями, найденными на момент времени 1.995 млн лет. Такие соударения приводят как к росту массы протоядер, так и к их разрушению. Кроме того, расчеты показывают, что рост плотности происходит за счет втекания (аккреции) вещества из окружающей среды.

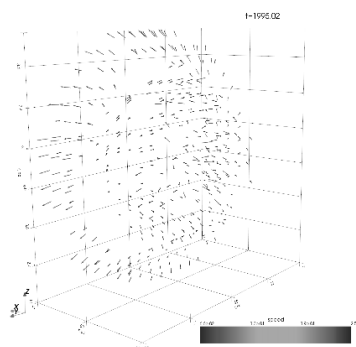


Рис. 1. Поле скоростей сверхплотных ядер на момент времени 1.995 млн. лет

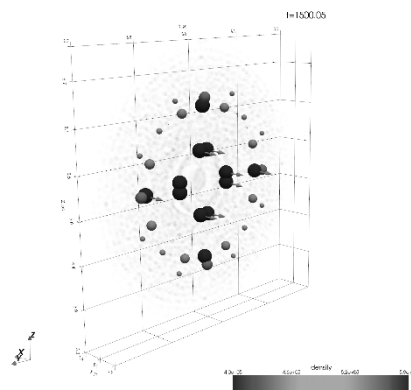


Рис. 2. Сверхплотные ядра на момент времени 1.5 млн. лет

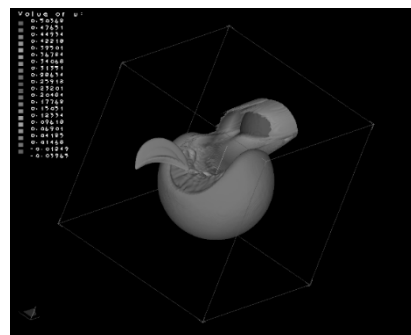


Рис. 3. Соударение двух протоядер на момент времени 1.5 млн. лет

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ МИКРОКАНАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОПЕРЕНОСА

Солнышкина О.А., Батыршин Э.С.

Уфимский университет науки и технологии,
ул. Заки Валиди 32, Уфа, 450076, Россия

В условиях интенсивного развития микроэлектронной промышленности возрастает потребность в высокоэффективных системах теплоотвода на основе мини- и микромасштабных систем, разработка наиболее эффективных конфигураций которых требует глубокого понимания особенностей тепло- и массопереноса в таких системах. Структура микроканалов в данном случае имеет решающее значение, поскольку она должна обеспечивать максимально возможную площадь поверхности теплообмена и приемлемые гидродинамические потери при прокачивании теплоносителя. Для оптимизации производительности таких систем необходим тщательный подход к проектированию геометрии, размеров и компоновки микроканалов. Ключевыми факторами являются форма потоковых каналов, конструкция входных и выходных распределителей, наличие дополнительных элементов (например, оребрений или пинов) и режим его использования.

Настоящая работа посвящена комплексному численному и экспериментальному исследованию влияния конфигурации микроканальных структур на гидродинамические характеристики и эффективность теплообмена при течении однофазного теплоносителя. Варьировался комплекс параметров: размер пинов, параметры переупаковки массива пинов внутри плоского микроканала, конфигурация входного и выходного распределителя потока, плотность теплового потока на нижней подложке микроканала и пинов, а также объемный расход прокачиваемого теплоносителя. Анализ литературы показывает, что, несмотря на значительный объем исследований, посвященных проектированию микрофлюидных систем охлаждения, эффективности двухмасштабных пространственных компоновок пинов уделено ограниченное внимание.

Для проведения экспериментальных исследований была отработана методика изготовления микрофлюидных чипов из стекла для визуализации течений и поля температуры и монокристаллического кремния. В поверхности кремниевой подложки методом плазмо-химического травления были вытравлены микроканалы заданной конфигурации. Кроме того, была сконструирована ячейка-держатель для микрочипа с возможностью подвода тепла и охлаждающей жидкости. Разработан экспериментальный стенд на базе флуоресцентного оптического микроскопа для исследования термогидродинамических процессов в мини- и микрофлюидных теплообменниках.

Реализована методика визуализации температурного поля с применением флуоресцентной термометрии, позволяющая получать температурные карты с высоким пространственным разрешением и анализировать термогидродинамические процессы в теплооб-

менниках с массивом микроструктур. Данная методика позволила выявить пространственные температурные неравномерности на отдельных участках микроканалов (пример визуализации для одной из конфигураций представлен на рис. 1), а также вблизи отдельных пинов.

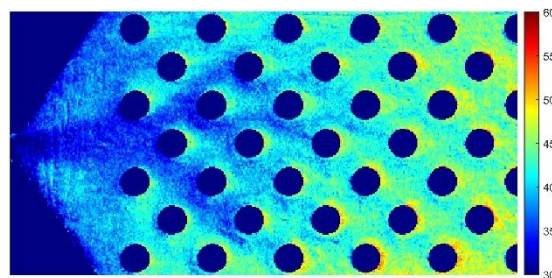


Рис. 1. Температурное поле вблизи распределителя потока.

Получены новые экспериментальные данные по эффективности теплообмена и распределению температурного поля в зависимости от объемного расхода теплоносителя для различных вариантов распределителя и упаковки пинов. Выявлены характерные зоны рециркуляции и локального перегрева, а также показано, что модификация распределителя позволяет целенаправленно усиливать теплоотвод в определенных областях канала.

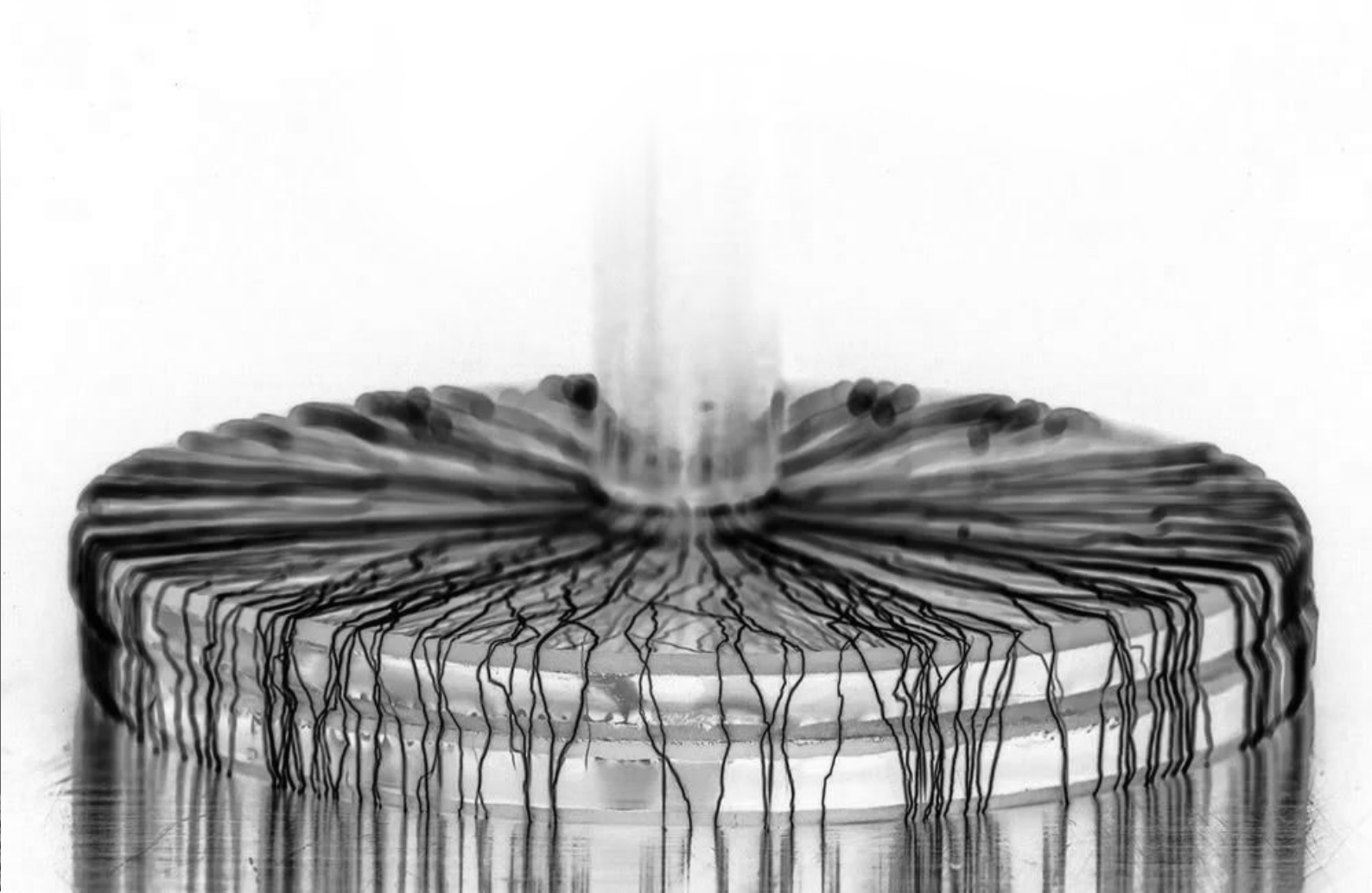
Многopараметрические расчеты производились в среде в среде ANSYS Fluent (2021R2). Проведено сопоставление экспериментальных данных с результатами численного моделирования с учетом температурно зависимых свойств теплоносителя. Получено хорошее соответствие по кривым ΔT , локальным структурам течения и картам температурных полей, что подтверждает корректность используемых численных моделей.

Для каждой исследуемой конфигурации проводилась оценка изменения объемного расхода и коэффициента гидравлических потерь на трение, на основе интегрального теплового баланса канала рассчитывались средний коэффициент теплоотдачи и среднее число Нуссельта, а также общий критерий оценки эффективности.

Продemonстрировано, что внутренняя структурная оптимизация массива пинов может повысить термогидродинамическую эффективность теплообменника. Полученные выводы подчеркивают необходимость учета сопряженных эффектов распределения потока и микроструктурной организации внутреннего пространства при проектировании компактных теплоотводов для систем охлаждения электроники, фотоники и микрофлюидных устройств.

Работа поддержана РНФ
(грант № 24-19-00697)
<https://rscf.ru/project/24-19-00697/>.

СЕКЦИЯ 6
Электрофизические явления
в газовых и жидких средах



**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМУЛЬСИИ ТИПА ВОДА В ДИЭЛЕКТРИКЕ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ С УЧЁТОМ НЕКОАЛЕСЦЕНЦИИ****Васильков С.А.**Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб. 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

Сырая нефть при добыче загрязнена водой, которая должна быть удалена перед её дальнейшей транспортировкой и переработкой. Распад водонефтяной эмульсии под действием гравитации может занимать длительное время, так как остатки воды содержатся в нефти в виде медленно оседающих мелких капель. Поэтому для ускорения процесса распада эмульсии используются различные технологии, включая воздействие электрического поля. В электрическом поле капли воды поляризуются, притягиваются к друг другу и объединяются в капли большего размера, которые оседают гораздо быстрее. Однако, если напряжённость электрического поля слишком велика или если капли слишком большие, то вместо коалесценции капли могут отскакивать друг от друга или распадаться на множество мелких капель.

Компьютерное моделирование может ускорить проектирование и настройку установок, осуществляющих очистку за счёт действия электрического поля (электродегидраторов). Однако для этого должны быть построены компьютерные модели, адекватно описывающие весь спектр ключевых процессов, которые происходят в эмульсии в электрическом поле. Взаимодействия отдельных капель, в результате которых капли могут отскочить друг от друга или породить множество мелких капель-осколков, рассчитываются при помощи конечно-элементных моделей [1]. Однако влияние таких исходов, отличных от коалесценции, на поведение эмульсии как системы из множества капель не ясно. Для исследования этого необходимо развивать дискретно-элементные модели.

В работе развивается дискретно-элементная модель, которая подразумевает решение системы уравнений движения капель и обработку их столкновений. В модели подразумевается, что капли движутся с термальной скоростью, обусловленной балансом между электрическими силами и силой сопротивления среды. Также для каждой капли учитывается, что движение соседних капель вызывает локальное течение жидкости, смещающее рассматриваемую каплю.

Данные об исходах взаимодействий капель [2–3], при их обобщении, позволяют создать простую модель исходов, которая может определять тип исхода и некоторые параметры образующихся капель.

Так как при отскоках или распадах капли заряжаются, в модели учтены заряды капель и их релаксация из-за конечной проводимости жидкого диэлектрика. Из-за того, что под действием силы Кулона со стороны внешнего электрического поля капли могут преодолевать большие расстояния, в модели реализованы периодические граничные условия, чтобы в области моделирования процент водосодержания оставался неизменным.

Проведены расчёты и изучено влияние учёта некоалесценции (отскоки, распыления) на эволюцию эмульсии и динамику отдельных капель в ней. Отскоки ограничивают рост капель больших размеров, в то время как маленькие капли продолжают расти. При этом большие капли имеют тенденцию выстраиваться в цепочки, часто отскакивая друг от друга.

Список литературы:

1. Chirkov V.A., Vasilkov S.A., Kostin P.A., Elagin I.A. Numerical models of two-phase electrohydrodynamics for simulating key processes in electrostatic coalescers: a review // *Journal of Electrostatics*. 2025. P. 104085.
2. Saifullin D. D., Lukin D. S., Samusenko A. V., Chirkov V. A. Regime map of non-coalescence between two equal-sized uncharged water droplets suspended in oil: A numerical study // *Physics of Fluids*. – 2024. – V. 36. – №. 12.
3. Chirkov V., Elagin I., Lutsek V. Numerical Modeling of Non-coalescence Outcomes for Different-sized Conducting Droplets Suspended in a Dielectric Liquid // 2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD). – IEEE, 2024. – P. 1-4.
4. Chirkov V. A., Kostin P. A. Generalization of numerical simulation results on the electrical coalescence threshold for two conducting droplets based on non-dimensional parameters // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2024. – V. 2701. – №. 1. – P. 012075.

*Работа поддержана РФФ
(грант № 24-79-00150).*

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МАСЛЯНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Коробейников С.М.¹, Герасимов В.Е.²¹ Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия² АО Россети-Новосибирск, ул. Якушева, 16а, Новосибирск, 630102, Россия

Исторически масляные выключатели широко применялись в сетях среднего и высокого напряжения. Однако в новых электроустановках масляная технология в значительной мере вытеснена вакуумными и элегазовыми выключателями, что обусловлено их меньшей пожароопасностью, сниженным объемом технического обслуживания, отсутствием проблем старения масла и более низкими затратами на протяжении жизненного цикла [1, 2]. Однако масляные выключатели имеют одно существенное преимущество по сравнению с элегазовыми и вакуумными выключателями: при их работе не образуются высокочастотные перенапряжения, наиболее опасные для витковой изоляции электрооборудования.

Механизм отключения в масляном выключателе не является мгновенным разрывом цепи. После команды на отключение привод разводит главные и дугогасительные контакты, и в малом межконтактном промежутке возникает электрическая дуга. При этом дуга существует не в объеме «чистого» масла, а в быстро расширяющемся газовом пузыре, образованном нагретыми парами масла, продуктами разложения масла, а также разрушения электродов. Энергетически явление может быть описан балансом мощности где электрическая энергия расходуется одновременно на поддержание плазмы, нагрев жидкости, химическое разложение углеводородов и ускорение потока среды.

Современные исследования показывают, что дуга в изоляционном масле представляет собой не только электрический, но и газодинамический процесс. Экспериментальные работы последних лет демонстрируют, что при развитии дуги формируется ударная волна, а давление в масле определяется как ее отражениями, так и пульсацией дугового пузыря. Для дуг промышленной частоты характерен выход газа порядка 50–100 мл/кДж (в зависимости от типа масла), причем газовая смесь содержит преимущественно водород (до 70 %), а также ацетилен и другие углеводороды. Исследования пиролиза при токах порядка 5 кА показывают рост удельного газовыделения от 0,0574 до 0,0982 л/кДж при температурах в пузыре на уровне нескольких тысяч кельвинов.

Успешное отключение определяется выполнением теплового и диэлектрического условий гашения дуги. Тепловое условие требует, чтобы к естественному переходу тока через нуль проводимости дугового канала снизилась до уровня, достаточного для его гашения. Диэлектрическое условие заключается в том, чтобы после нуля тока электрическая прочность межконтактного промежутка восстанавливалась быстрее, чем растет переходное восстанавливающееся напряжение

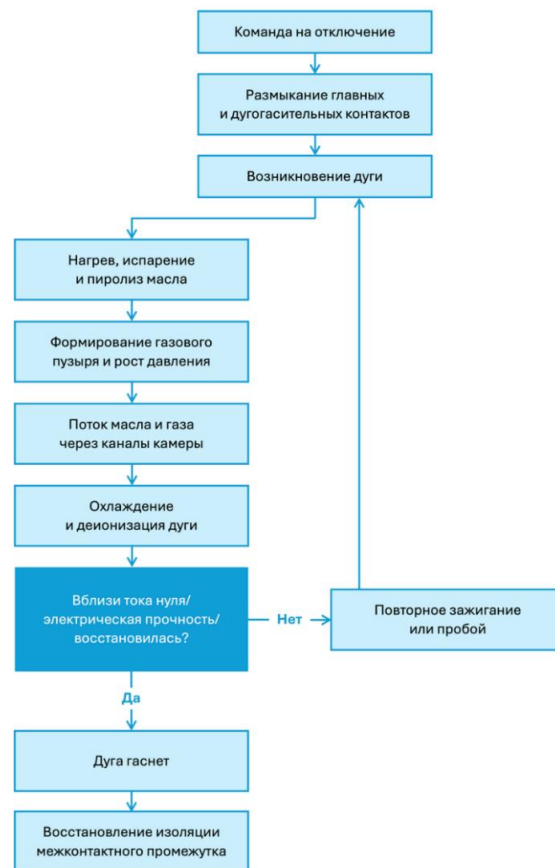


Рис. 1 Типичный цикл дугогашения в масляном выключателе

В условиях деградации изоляционного масла существенно изменяются характеристики дугового разряда. Это негативно влияет на процесс дугогашения и, как следствие, снижает надежность работы высоковольтных масляных выключателей.

Деградация трансформаторного масла сопровождается накоплением продуктов старения, в особенности проводящих частиц после разрушения электродов, которые резко снижают его электрическую прочность и ухудшают условия гашения дуги. Таким образом, состояние изоляционного масла является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность коммутационных процессов и эксплуатационную надежность выключателя.

Список литературы:

1. Smeets R.P.P., van der Sluis L., Kling W.L., Paice D.A.
2. Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems Chichester: John Wiley & Sons, 2015. — 600 p.
3. Zhang C. Et al. Condition assessment of high-voltage circuit breakers using multi-parameter monitoring // Electric Power Systems Research. — 2022. — Vol. 208. — DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107872.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИМИ ИЗЛУЧЕНИЯМИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В ГЕЛИЕВОМ ПУЗЫРЬКЕ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

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

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

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

Известно, что фоновая радиация играет ведущую роль в инициировании электрических разрядов в пузырьках газов в изоляции. В работе [1] выполнялись эксперименты по зажиганию разрядов в миллиметровых пузырьках, заполненных гелием, в трансформаторном масле. Было показано, что в условиях, когда поток ионизирующего излучения (космические лучи, наземные источники) максимально ограничен, вероятность частичного разряда (ЧР) менее 10^{-5} . При этом, при включении искусственного импульсного источника рентгеновского излучения вероятность электрического пробоя пузырька приближалась к 1. В настоящей работе выполнен анализ процессов, ответственных за инициирование ЧР в гелиевом пузырьке при воздействии рентгеновского излучения.

Выполнены измерения потока излучения импульсного рентгеновского аппарата «МИРА-2Д», в котором в качестве источника рентгеновских фотонов использовалась трубка «ИМА2-150Д». Напряжение на трубке не превышает 150 кВ, использовалась частота следования импульсов 10 Hz с длительностью импульса примерно 15 нс. Измерена индикатриса рентгеновского излучения, которая оказалась отличной от паспортной индикатрисы. На расстоянии 41 см от рентгеновской трубки в течении 20 с (200 импульсов) измерялась экспозиционная доза излучения (ДК-02) при разных углах к оси симметрии трубки. Также измерялось изменение дозы излучения при прохождении его через свинцовые экраны разной толщины. Полученные данные, а также технические характеристики аппарата, позволили оценить количество рентгеновских фотонов в одном импульсе (длительность ~20 нс). Также построена простая модель спектра фотонов на входе излучения в трансформаторное масло.

Газовый пузырек виден из точки выхода пучка под углом 0.57 градусов. При таких угловых размерах рассеянные вследствие комптон-эффекта лучи будут уходить из пучка, а сам падающий на пузырек пучок может считаться параллельным. По данным базы [2] рассчитано затухание рентгеновского пучка в 4х углеводородах: н-гексане, циклогексане, декане и бензоле. Показано, что коэффициенты затухания для этих углеводородов практически одинаковы в диапазоне энергий 1-150 кэВ, при этом в диапазоне 1-15 кэВ преобладают потери на фотоэффект, в диапазоне 50-150 кэВ потери связаны с упругим рассеянием, а в диапазоне 15-50 кэВ оба механизма дают сравнимый вклад в затухание. Вычислено изменение спектра фотонов при прохождении слоя трансформаторного масла толщиной 5 см (от края экспериментальной ячейки до пузырька) по сравнению с исходным спектром. По данным о поглощении рентгеновского излучения в гелии

сделан расчет числа актов ионизации в пузырьке размером 2 мм; результаты расчета дает 2-3 события за один импульс.

Сделана количественная оценка вероятности появления фотоэлектронов в трансформаторном масле в зависимости от глубины проникновения рентгеновского излучения. С учетом спектра рентгеновского излучения вычислено количество электронов, образующихся в масле. Показано, что при рассмотрении процессов переноса электронов в трансформаторном масле необходимо учитывать ионизационные потери (формула Бете) [3], при этом тормозное излучение не играет значения, так его максимальный вклад в потери электронами энергии менее 0.2%. По данным [4] выполнена оценка толщины слоя трансформаторного масла, в котором электроны данной энергии теряют свою ионизационную способность. Показано, что ионизация газового пузырька возможна из слоя трансформаторного масла толщиной не более 300 мкм. Электроны, пришедшие из этого слоя, могут обеспечить от 4 до 12 актов ионизации атомов гелия в пузырьке на один электрон. Выполнена оценка количества электронов в данном диапазоне энергий, приходящих в пузырьки из масла.

Таким образом, анализ процессов переноса ионизирующих излучений в углеводородах показал, что при воздействии импульсного рентгеновского излучения электрический разряд в газовом пузырьке может инициироваться как фотонами, так и фотоэлектронами, однако вклад фотоэлектронов должен быть значительно выше и при описании инициирования разряда в газовых пузырьках в высоковольтной изоляции следует учитывать именно его. Этот вывод подтверждает предположение, выдвинутое в работе [5].

Список литературы:

1. Korobeynikov S.M., Ridel A.V., Lyutikova M.N. Experimental studies of partial discharges in bubbles exposed to X-ray radiation // IEEE 22 International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM) : proc., Altai Region, 30 June – 4 July 2021, Novosibirsk:IEEE, 2021, pp. 251–254. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507603.
2. https://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom3_1
3. Bethe H. Bremsformel für elektronen relativistischer geschwindigkeit // Z. Phys. 1932. V. 76. P. 293–299.
4. Баранов В.Ф. Дозиметрия электронного излучения. М.: Атомиздат, 1974, 232 с.
5. Korobeynikov S.M., Ridel A.V., Bobrovskaya S.S., Shevchenko V.E. Features of partial discharges in bubbles irradiated with X-rays // IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. 2025. V. 32, N 1. P. 428 – 434. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3466111

Работа выполнена за счет РНФ
(грант № 22-79-10198)

<https://ias.rscf.ru/user/doc/a.w.p.2025.5071.main/23596691>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ПРОВОДЯЩИЕ ЧАСТИЦЫ

Коробейников С.М.¹, Герасимов В.Е.²

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

² АО Россети-Новосибирск ул. Якушева, д.16а, Новосибирск 630102, Россия

Жидкие диэлектрики, в первую очередь это относится к трансформаторному маслу, выполняют две функции: они являются электрической изоляцией и теплоотводящей средой. При этом, основной параметр электрической изоляции, а именно, электрическая прочность, сильно зависит от наличия твердых, жидких и газообразных примесей [1]. Понятно, что пузырьки уменьшают электрическую прочность в силу малой собственной прочности. Влага в виде капель приводит к локальному усилению поля и, тем самым, провоцирует возникновение пробоя. По сути, такую же роль играют металлические, углеродные и другие проводящие частицы, например, целлюлозные волокна. На первый взгляд, наиболее очевидно влияние пузырьков, в силу низкой электрической прочности газа. С влагой тоже тенденция понятна: когда она в эмульгированном состоянии происходит локальное усиление поля у кончиков вытянувшихся капель. Аналогичная ситуация с целлюлозными увлажненными волокнами, ввиду локального усиления поля у кончиков ориентированных волокон. С проводящими микро и наночастицами физическая картина не столь очевидна. В настоящей работе рассматриваются проводящие наночастицы и их роль в электрическом пробое.

При воздействии постоянного напряжения частицы образуют мостики между электродами, значительно снижающие электрическую прочность. В случае переменного напряжения ситуация сложнее: мостики не образуются, считается, что агломерация происходит [2] и вследствие этого напряженность пробоя также падает.

Таким образом, можно считать установленным, что:

- при переменном напряжении наличие проводящих частиц уменьшает напряженность пробоя;
- частицы могут агломерироваться;
- эти процессы происходят в случае частиц любых размеров, вплоть до нанометров;
- вероятный механизм снижения электрической прочности связан с увеличением напряженности в жидкости за счет электропроводных частиц.

Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое исследование особенности пробоя жидкостей, содержащих проводящие частицы.

В качестве диэлектрической жидкости выбрано трансформаторное масло, в качестве проводящих частиц - наночастицы углерода с размером 50 нм. Жидкость предварительно дегазировалась, после добавления частиц подвергалась ультразвуковой обработке. Электрическая прочность измерялась в стандартном разряднике с помощью прибора автоматического измерения напряжения пробоя СКАТ М-100В.

Полученные данные, вместе с результатами моделирования приведены на рис. 1.

Модель влияния частиц на электрическую прочность основана на агрегировании частиц, построения протяженных структур, вытянутых вдоль направления электрического поля. На кончиках этих структур напряженность поля повышена, что и приводит к пробоям. Модель собирания элементов мостиков, не связанных с электродами, а находящимися в объеме жидкости, основана на взаимном притяжении наведенных диполей. Мостики, ориентированные вдоль поля, приводят к усилению локальной напряженности у кончиков, что может привести к пробоям. Под действием электрического поля наведенные диполи сближаются, формируя вдоль поля последовательность n частиц. В модели считается, что пробой произойдет, если за время подъема напряжения составит такая структура, локальная напряженность у кончиков которой, соответствует напряженности пробоя чистой жидкости. Из решения дифференциального уравнения получается зависимость электрической прочности от объемного содержания частиц.

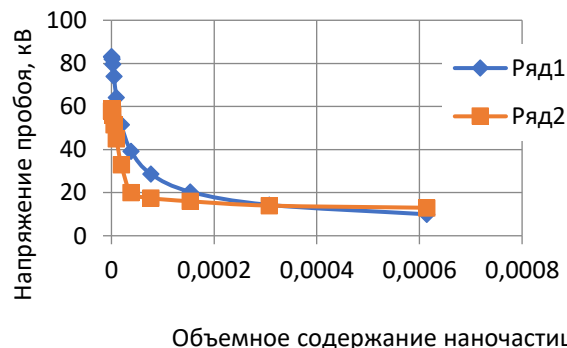


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные данные по пробивному напряжению масла с наночастицами углерода.
Ряд 1 - расчет, ряд 2 - эксперимент.

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывает очень хорошее соответствие, что указывает на справедливость и точность предложенной простой модели.

Список литературы:

1. Pan C., Tang J., Chen G. et al. Review about PD and breakdown induced by conductive particles in an insulating liquid (2020). High Volt., 2020, Vol. 5 Iss. 3, pp. 287-297.
2. Гиндин Л. Г., Вольпян А. Е. Структурирование дисперсных систем в электрическом поле (1968). Успехи химии т. XXXVII 1968 г. Вып. I стр. 130-142

ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТОЛЩИНОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Куперштох А.Л., Медведев Д.А.

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

Для охлаждения горячих поверхностей широко используются тонкие пленки жидкости. Эффективность такого метода связана с тем, что поверхность жидкости сильно охлаждается при испарении из-за поглощения скрытой теплоты испарения [1]. Один из методов удаления пара от поверхности испарения является процесс, используемый в так называемых «тепловых трубках», где отводимый пар конденсируется на специальном участке тепловой трубки с пониженной температурой [2].

Для интенсификации процесса может использоваться неоднородное электрическое поле над непроводящей вставкой в нижнем электроде, что приводит к утончению пленки над ней (рис. 1) [1]. Распределение потенциала электрического поля φ в диэлектрическом флюиде получается путем решения уравнения Пуассона $\text{div}(\varepsilon \text{grad} \varphi) = 0$.

Под действием неоднородного электрического поля пленка жидкости в области непроводящей вставки (рис. 1) становится все тоньше и тоньше [1]. При этом градиент температуры локально увеличивается, и тепловой поток начинает возрастать.

Толщина пленки на нагревателе (4) над центром изоляционной вставки (3) быстро уменьшается после включения электрического поля. При этом поток тепла постепенно увеличивается, что связано с ускорением процесса испарения пленки.

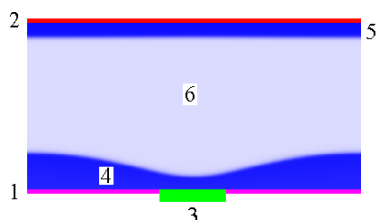


Рис. 1. Схема охлаждения. 1, 2 – нижний и верхний электроды, 3 – изоляционная вставка, 4 – пленка жидкости на нагревателе, 5 – пленка жидкости на конденсаторе паров, 6 – пар. Размер расчетной области 400x200.

В данной работе предложено организовать периодический процесс.

Компьютерное моделирование динамики флюида, конвективного переноса тепла с учетом скрытой теплоты фазовых переходов на границах жидкость-пар осуществлялось методом решеточных уравнений Больцмана [3]. Перенос тепла за счет теплопроводности учитывался с помощью метода конечных разностей.

Решалась двумерная задача о деформации первоначально плоской пленки жидкого диэлектрика начальной толщиной δ , лежащей на нижнем электроде (1) с непроводящей вставкой (3). Ширина изоляционной вставки $2R_{in}$.

В [1] было показано, что в случае разрыва пленки поток тепла уменьшается, несмотря на возникновение новых контактных линий, вблизи которых плотность потока тепла выше.

С целью предотвратить разрыв пленки и появление сухих пятен, предложен режим включения-выключения поля с обратной связью по толщине пленки над изоляционной вставкой. Пары жидкости конденсируются на холодном верхнем электроде и возвращаются оттуда по специальным каналам перетока в некоторый нижний слой пленки, находящейся на нагревателе.

Зависимости теплового потока с поверхности изоляционной вставки от времени приведены на рис. 2 для разных размеров изоляционной вставки. Пики на графиках соответствуют утончению пленки под действием электрического поля.

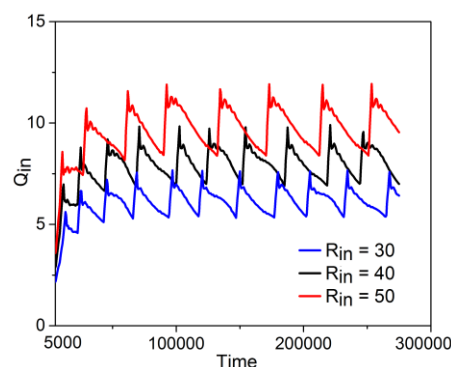


Рис. 2. Зависимости теплового потока с поверхности изоляционной вставки Q_{in} . Размеры вставки $R_{in} = 30, 40$ и 50 . Температура нагревателя $T_h = 0.75$.

Таким образом, показано, что возможно осуществить процесс охлаждения нагревателя при регулярном импульсном воздействии неоднородного электрического поля на диэлектрическую пленку жидкости с целью значительно увеличить среднее значение теплоотвода от подложки по сравнению со случаем без электрического поля.

Список литературы:

1. Kupershtokh A.L., Medvedev D.A., Alyanov A.V. Heat flux from the surface in the process of the rupture of a thin liquid film by an electric field. *Phys. Fluids*. 2023. V. 35, N 10. P. 102006.
2. Maydanik Y. F. Loop heat pipes (Review article). *Appl. Therm. Eng.* 2005. V. 25, N 5–6. P. 635–657.
3. Kupershtokh A.L., Medvedev D.A., Gribanov I.I. Thermal lattice Boltzmann method for multiphase flows. *Phys. Rev. E*. 2018. V. 98, N 2. P. 023308.

Работа выполнена за счет РНФ,
<https://rscf.ru/project/25-29-00310/>
(грант № 25-29-00310).

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА КАК МЕХАНИЗМ ИНИЦИИРОВАНИЯ СТРИМЕРОВ В ЖИДКОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ

Ридель А.В., Коробейников С.М., Бычков А.Л., Ломан В.А.

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

Наличие газовых включений в жидкой изоляции высоковольтного оборудования является одной из основных причин пробоя жидкого диэлектрика. При этом первой стадией процесса всегда является частичный разряд (ЧР) в газовом пузырьке [1-2]. Несмотря на многолетние исследования, механизм перехода от ЧР в газовом пузырьке к стримерной фазе в жидкости оставался экспериментально неподтверждённым. Ранее [3] наш коллектив экспериментальным методом исследовал возможные механизмы перехода разряда в пузырьке в стримерную фазу в жидкости. Однако из-за низкого пространственно-временного разрешения мы могли зарегистрировать только последствия процесса, а не его причину. В настоящей работе с высоким пространственно-временным разрешением впервые зарегистрирована эволюция неустойчивости поверхности гелиевого пузырька после ЧР, которая приводит к зарождению стримеров в трансформаторном масле.

Экспериментальная установка была модернизирована для теневой регистрации с временем экспозиции 1 мкс и пространственным разрешением до 22 мкм/пиксель, что позволило надёжно фиксировать объекты размером от 60 мкм и скоростями до 10 м/с. Разработана и внедрена схема синхронизации запуска высокоскоростной камеры (до 40 418 к/с при разрешении 320×96) по импульсу тока ЧР. Уровень шума на осциллографе составлял ≈ 2 пКл при регистрируемых кажущихся зарядах ЧР от десятков до сотен пКл. Эксперименты проводились в ячейке с единственным пузырьком гелия в области максимальной напряжённости поля, что гарантировало жёсткую привязку измеряемых сигналов к визуализируемым процессам.

В результате получены теневые картины поверхности пузырька после развития ЧР. Установлено, что на полюсе пузырька формируется неустойчивость границы раздела «газ–жидкость», развивающаяся в

виде локальных выступов. Именно эти выступы служат инициаторами стримерных каналов в масле. Измеренное расстояние между соседними каналами составляет ≈ 100 мкм, а скорость движения границы выступа – около 1 м/с, что согласуется с оценками по электрострикционному механизму. Выявлен стадийный характер роста стримеров: фазы быстрого удлинения каналов циклически сменяются фазами затухания. Одновременная регистрация тока ЧР показала, что моменты возобновления роста стримеров сопровождаются повторными ЧР в пузырьке, подтверждая гипотезу о циклической подпитке поверхности зарядом.

Полученные результаты впервые дают прямое экспериментальное доказательство того, что неустойчивость заряженной поверхности пузырька является тем механизмом, который создаёт условия для перехода разряда из газовой фазы в жидкость. Работа создаёт основу для построения полной численной модели ЧР – от появления иницирующего электрона до формирования проводящего канала в жидком диэлектрике.

Список литературы:

1. S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel, D. A. Medvedev, D. L. Karpov, A. G. Ovsyannikov, M. B. Meredova. Registration and Simulation of Partial Discharges in Free Bubbles at AC Voltage // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. Vol. 26. № 4. P. 1035–1042.
2. Karpov D. I., Ridel A. V., Savenko R. A., Korobeynikov S. M. Initiation of a streamer in a liquid from the surface of a bubble in which a partial discharge occurred // Eurasian Journal of mathematical and computer applications. 2023 Vol. 11, iss. 3. P. 63-75.
3. S. M. Korobeynikov, A. V. Ridel, A. G. Ovsyannikov, D. I. Karpov, M. N. Lyutikova, V. A. Loman, R. A. Savenko. Streamers in transformer oil initiated by partial discharge in a bubble at low AC electric fields // Electrical Engineering. 2024. Vol. 106, iss. 4. P. 5219–5228.

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

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ГЕЛИЕВОГО ПУЗЫРЬКА В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЧНОГО РАЗРЯДА

Савенко Р.А.^{1,2}, Карпов Д.И.^{1,2}

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

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

Частичные разряды (ЧР) в изолированных пузырьках газа в жидком диэлектрике могут привести к нарушению изоляции и электрическому пробоев межэлектродного промежутка [1]. Регистрация ЧР происходит с использованием измерительной электрической цепи. По графику силы тока в измерительной цепи вычисляют "кажущийся" заряд - наведённый в процессе ЧР заряд на электродах. Хотя аналитическое описание зависимости между коэффициентом деформации и "кажущимся" зарядом имеется [2], [3], особенности динамики процесса еще не описаны. В данной работе получены значения "кажущегося" заряда при различных степенях деформации пузырька гелия и проведено сравнение с данным из других работ по данной тематике.

В качестве модели используется пузырёк гелия в форме эллипсоида вращения с коэффициентами деформации 1, 1.5 и 1.8, помещённый по центру между двумя параллельными плоскими электродами. В пузырьке в различных точках помещалась затравка положительных ионов гелия и электронов с суммарным зарядом 0 Кл, которая начинала движение под действием внешнего электрического поля.

Для расчёта динамики заряженных частиц использовался закон сохранения заряда, записанный в форме концентраций с учётом диффузии, ударной ионизации электронами и рекомбинации. При этом коэффициенты ударной ионизации электронами, подвижности и диффузии электронов считались функциями от локального электрического поля, построенными на основе экспериментальных данных из работ [4], [5]. Электрическое поле вычислялось по уравнению Пуассона.

Было замечено, что положение затравки оказывает влияние на форму регистрируемого сигнала тока, чего не наблюдается в экспериментах. При симметричном положении затравки (на оси вращения пузырька параллельной внешнему электрическому полю) наблюдается резкий пик импульса тока, в то время как при несимметричном положении этот пик сильно сглажен (см. рис.).

При увеличении степени деформации пузырька импульсы силы тока увеличивались для симметричного положения, для несимметричного положения значения силы тока также возрастали.

Были получены значения "кажущегося" заряда на электродах. Для сферического пузырька величина «кажущегося» заряда составляет приблизительно 215 пКл, для эллипсоидального пузырька с соотношением полуосей 1,5 – 435 пКл. Эти результаты близки к значениям «кажущегося» заряда, полученным в работе [3] с учётом перерасчёта: 240 пКл для сферического

пузырька и 410 пКл для эллипсоидального пузырька с коэффициентом деформации 1,5.

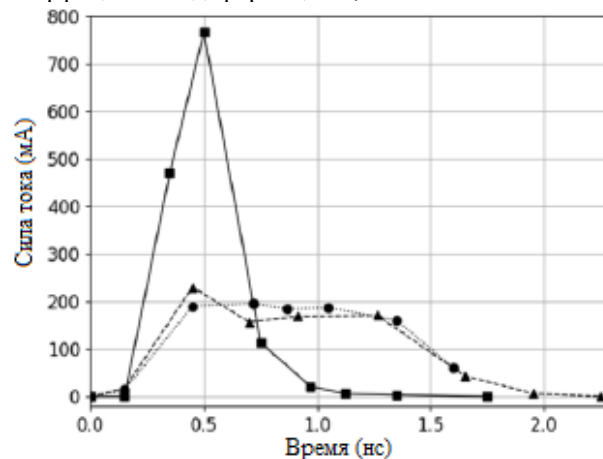


Рис. Зависимость тока на аноде от времени для сферического пузырька. Сплошная линия и квадратные маркеры для затравки на оси симметрии пузырька, пунктирная линия и треугольные маркеры для затравки, слегка удаленной от оси симметрии, пунктирная линия и круглые маркеры - затравка, сильно удалена от оси пузырька

Для перерасчёта использовалось утверждение, что величина наведённого на электроде заряда зависит от соотношения размера пузырька и межэлектродного промежутка. После соответствующего перерасчёта значения были подставлены в зависимости с подобранными коэффициентами из работы [3].

Таким образом, были получены данные по особенностям регистрации ЧР в пузырьке гелия в жидком диэлектрике, что может быть полезно при дальнейшем изучении процесса ЧР в пузырьке. Было проведено сравнение полученных данных с теоретической моделью и известным экспериментом, показавшее соответствие расчёта с данными измерений.

Список литературы:

1. Korobeynikov S.M., Ridel 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. Pedersen A., Crichton G.C., and McAllister I.W., "The functional relation between partial discharges and induced charge," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 1995, vol. 2, no. 4, pp. 535–543.
3. Korobeynikov S.M., Ovsyannikov A.G., Ridel A.V. et al. "Study of partial discharges in liquids", *J. Electrostat.* 2020, vol. 103, pp. 103412 (10p).
4. Смирнов Б.М.. «Свойства газоразрядной плазмы, СПб.: Издательство Политехнического университета, 2010, с. 361.
5. Ran J., Luo H., Yue Y. et al. 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

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РУДОТЕРМИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ

Андрющенко В.А., Смовж Д.В.

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

Одним из ключевых трендов современной металлургии является внедрение низкотемпературной плазмы для интенсификации процессов восстановительной плавки. Оснащение рудотермических печей электродуговыми плазмотронами создает предпосылки для повышения их энергетической эффективности и гибкости управления технологическим режимом благодаря отдельной регулировке подводимой мощности и химического состава плазмообразующей среды. Вместе с тем, результативность такого технического решения во многом определяется однородностью теплового поля внутри реактора. Неоптимальная конфигурация рабочей камеры и неудачное взаимное расположение источников плазмы способствуют появлению застойных гидродинамических зон и неравномерной термической обработки загружаемого сырья. Данное обстоятельство негативно сказывается на степени извлечения целевых компонентов и ведет к росту энергозатрат, приходящихся на единицу продукции [1,2]. Традиционные эмпирические подходы к проектированию подобных систем сопряжены с необходимостью проведения масштабных и дорогостоящих физических опытов. Альтернативой выступают методы вычислительной гидродинамики, которые позволяют осуществлять виртуальное тестирование установок еще на стадии проектирования [3].

В рамках настоящей работы ставится задача создать методику трехмерного вычислительного анализа газодинамических и тепловых явлений в рудотермическом реакторе, оборудованном тремя плазмотронами единичной мощностью 30-60 кВт. Конечная цель - найти такие геометрические параметры установки, которые обеспечат максимальную равномерность температурной карты в области обработки рудной шихты. В основу моделирования положены представления о газодинамических факторах, определяющих структуру потоков в устройствах с плазменным нагревом [4]. Решалась полная система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. В расчетах учитывались конвективный и радиационный теплообмен, а также температурно- и давление-зависимые теплофизические характеристики плазмообразующего газа. Варьировались три геометрических фактора: угол отклонения плазмотронов от вертикали, зазор между сопловым срезом и зеркалом ванны расплава, а также форма арочного перекрытия печи.

Помимо варьирования геометрической компоновки установки, в ходе вычислительных экспериментов исследовалось влияние ряда рабочих характеристик самих плазменных источников. В частности, анализировалась роль плазмообразующего газа. Показано, что выбор газа существенно влияет на энтальпию, теплофизические свойства струи и эффективность теплообмена с перерабатываемой шихтой. Кроме того, варьировалась геометрия закручивающего устройства (вихревого кольца), установленного

внутри анодного узла плазмотрона. Изменялись число тангенциальных каналов и угол ввода газа. Данные параметры определяют интенсивность закрутки плазменного потока, что, в свою очередь, влияет на длину факела, его радиальное раскрытие и устойчивость дугового разряда. Таким образом, поиск оптимального режима работы установки выполнялся по двум независимым направлениям: внешней геометрии реактора и внутренним характеристикам плазмотронов.

Проведенные численные эксперименты позволили построить распределения скоростей и температур для ряда вариантов компоновки. С помощью модели удалось локализовать рециркуляционные зоны течения. Полученные данные хорошо коррелируют с известными выводами о целесообразности сужения (контрагирования) высокотемпературного потока в приосевой области для сокращения тепловых потерь через стенки [2]. Показано, что предпочтительным является размещение плазмотронов под углом примерно 20° к вертикали с ориентацией факелов в точку, отстоящую от центра ванны на величину порядка $2/3$ её радиуса. В такой схеме плазменные струи перекрываются, формируя протяженную зону с выравненным температурным профилем. Сравнительный анализ разных форм свода выявил преимущество конической крыши с раствором около 120° : она способствует развитой рециркуляции отходящих горячих газов, что усиливает конвективный подогрев верхних горизонтов загрузки. Для расстояния от среза сопла до поверхности ванны определена оптимальная величина: ее увеличение ведет к чрезмерной диссипации энергии и снижению температуры в пятне контакта с материалом, а уменьшение вызывает локальный перегрев сырья с риском его нежелательного термического разложения. Разработанный вычислительный инструмент пригоден для геометрической оптимизации плазменных реакторов на проектной стадии, что позволяет снизить затраты на испытания и повысить КПД.

Список литературы:

1. Shi H., Wang S., Wang P. From simulation to reality: CFD-ML-driven structural optimization and experimental analysis of thermal plasma reactors // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024. Vol. 12, No. 3. P. 112998.
2. Мышкин В.Ф. и др. Формирование газового потока в плазмохимическом реакторе // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 1. С. 91-99.
3. Chien S.W. et al. Modelling of thermal plasma-assisted carbon tetrafluoride abatement // Journal of Cleaner Production. 2024. V. 434. P. 139952.
4. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Методические основы автоматизированного газодинамического проектирования в электроплазменных технологиях // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20 (1). С. 62-70.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации
(соглашение № 075-15-2025-572)*

СЕКЦИЯ 7
Теплообмен и гидродинамика
в технологических процессах,
энергоэффективность,
защита окружающей среды



ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНЫХ ПЕЛЛЕТ В УСЛОВИЯХ НИЗКО- И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРЕВОВ

Солодовникова Ж.А., Кузнецов Г.В., Баранова А.А., Некрасов С.С., Плинокосов К.М.

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

Мировой тренд на декарбонизацию тепловой энергетики инициирует интенсивный поиск технологических решений, обеспечивающих постепенный отказ от исключительного использования ископаемых углей без радикальной модернизации существующей инфраструктуры. Одним из наиболее реалистичных переходных сценариев признано совместное сжигание традиционного угля и углерод-нейтральной биомассы в пылеугольных котлах [1–3]. В этом контексте древесно-угольные пеллеты выступают как компромиссный топливный продукт, в котором высокая теплотворная способность угольной составляющей органично сочетается с пониженным выходом оксидов серы и нейтральным балансом CO_2 , свойственным древесной фазе. Однако до настоящего времени физические закономерности, управляющие сменой режимов зажигания таких композитных частиц, оставались слабо систематизированными. В частности, отсутствовали надёжные экспериментальные данные, позволяющие очертить температурные границы, при которых ведущий механизм воспламенения (гетерогенное возгорание непосредственно на поверхности углеродного каркаса либо газофазная вспышка выделившихся летучих) сменяет друг друга, и как на положение этих границ влияет массовая доля угля в пеллете. Целью работы является установление взаимосвязи между температурой газовой среды, составом топливной композиции и доминирующим типом воспламенения (гетерогенным или газофазным) в условиях радиационно-конвективного теплоподвода.

Экспериментальная база реализована на стенде, включающем цилиндрическую камеру сгорания с системой регулируемого нагрева окислителя и высокоскоростной камеры. Принципиальной особенностью методики стало применение высокоскоростной съёмки в комбинации с лазерной подсветкой формирующей реакционной зоны. Данный подход позволил визуализировать микроструктуру окрестности частицы, надёжно дифференцируя момент воспламенения летучих от момента непосредственного возгорания коксового каркаса пеллеты. Объектами тестирования служили цилиндрические пеллеты на основе сосны, в матрицу которых вводился уголь в массовых концентрациях 50%, 70% и 90%.

В ходе серий замеров фиксировались временные задержки газофазного и гетерогенного воспламенения при варьировании температуры среды. Анализ кинетических кривых выявил нетривиальное влияние добавки угля на термическую подготовку топлива. Вопреки ожиданиям, интенсификация выхода летучих компонентов из древесной фазы нивелирует инерционность угольной составляющей на стадии прогрева. Вследствие этого время газофазной вспышки демонстрирует слабую чувствительность к

доле угля при фиксированной температуре. Иная картина наблюдается для гетерогенного зажигания коксового остатка: здесь угольная компонента, обладающая большей термической стойкостью, начинает лимитировать процесс по мере роста ее содержания в пеллете, особенно в области умеренных температур окислителя.

Ключевой результат работы заключается в идентификации температурной границы смены режима лимитирования (рис. 1). Установлено существование переходной области: ниже характерного порога (область низких и средних температур) реализуется преимущественно газофазный механизм, лимитируемый скоростью прогрева частицы, тогда как в высокотемпературной зоне происходит синхронизация либо опережение гетерогенной реакции на поверхности. Сдвиг концентрационного соотношения в пользу угля (до 90%) сужает температурный коридор чисто газофазного реагирования, одновременно увеличивая абсолютное время полного выгорания, но радикально повышая интегральное тепловыделение за счет подключения углеродного скелета. Полученные экспериментальные данные формируют основу для верификации прогностических моделей горения дисперсных композиционных топлив.

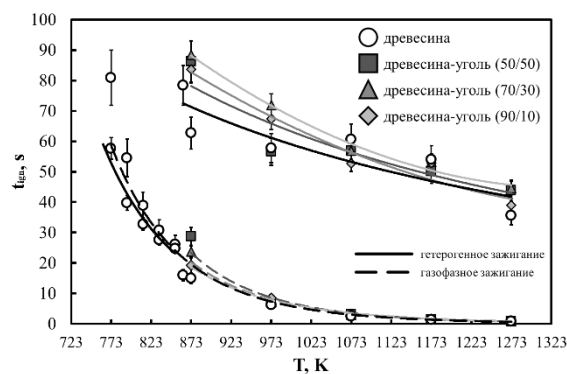


Рис. 1. Влияние температуры окислителя на времена задержек зажигания древесных и древесно-угольных пеллет

Список литературы:

1. Kholod N., Evans M., Kuklinski T., Malykhina A. The role of coal in Russia's energy security and climate strategy: A multi-model analysis // *Energy Strategy Reviews*. – 2024. – V. 51. – P. 101-309.
2. Strizhak P.A., Ryzhkov A.F. Ignition and combustion of composite fuels based on coal and biomass: A review of recent experimental studies // *Fuel Processing Technology*. – 2024. – V. 254. – P. 108-270.
3. Zaichenko A.M., Grebenkin K.V. Torrefaction of wheat straw for improving its co-firing properties with coal: A study on kinetics and grindability // *Renewable Energy*. – 2023. – V. 218. – P. 119-317.

Работа поддержана РНФ
(грант № 25-79-00127).

ОСОБЕННОСТИ ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ ПРИ НИЗКО- И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРЕВАХ

Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Баранова А.А., Некрасов С.С., Плинокосов К.М.

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

Совместное сжигание угля с биомассой рассматривается как один из путей декарбонизации теплоэнергетики. Порода древесины определяет выход летучих, пористую структуру и термическую стойкость коксового остатка, а значит – динамику воспламенения частиц в топочных условиях. Вместе с тем систематические данные о влиянии породного состава и характерного размера частиц на смену режимов зажигания (газофазного и гетерогенного) при температурах, типичных для пылеугольных котлов, практически отсутствуют. Цель работы – установить положение границы между этими режимами для частиц четырёх пород (сосна, берёза, кедр, лиственница) при варьировании их размеров в области низких и высоких температур.

Эксперименты проведены на стенде с регулируемой окислительной средой и высокоскоростной видеосъёмкой (частота кадров до 2400 с^{-1}). Лазерная подсветка позволила надёжно разделить газофазное воспламенение летучих и последующее гетерогенное горение коксового остатка. Исследовали кубические образцы древесины с ребром 4, 6 и 8 мм в интервале температур окислителя 600–1200 К.

Установлено, что при низких температурах первым происходит гетерогенное зажигание, а при высоких – газофазное. Критические температуры перехода T_{cr} для сосны, берёзы, кедра и лиственницы равны 908, 778, 858 и 760–798 К соответственно (рис. 1). Для лиственницы T_{cr} монотонно снижается с ростом размера частицы. Высокое значение T_{cr} сосны объясняется интенсивным выходом летучих из смолистой пористой структуры, требующим более высокой внешней температуры для создания горючей смеси. Берёза и лиственница с более плотной древесиной переходят к газофазному режиму раньше; кедр занимает промежуточное положение. Зависимость T_{cr} от размера только у лиственницы связана с замедленным прогревом крупных частиц и задержкой выхода летучих; для остальных пород T_{cr} от размера не зависит.

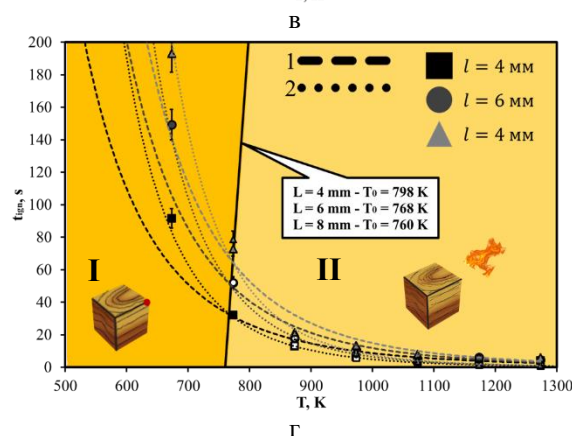
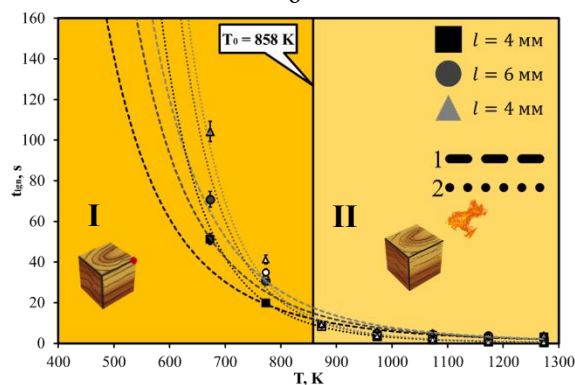
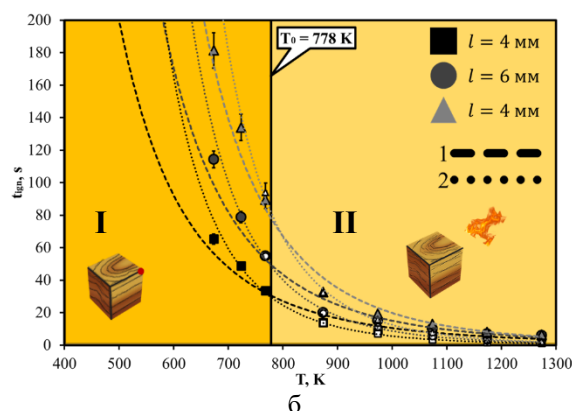
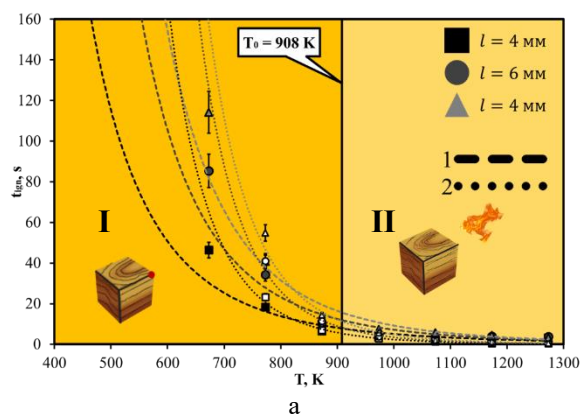


Рис. 1. Зависимости времён зажигания (1 – гетерогенное зажигание, 2 – газофазное зажигание) от температуры окислителя для древесины: а – сосны, б – берёзы, в – кедра, г – лиственницы, I – область гетерогенного зажигания, II – область газофазного зажигания

Полученные данные имеют прямое практическое значение для разработки адекватных моделей горения многокомпонентных топлив в топках энергетических установок. Знание критических температур позволяет оптимизировать режимы воспламенения, снижая выход недожога и вредных выбросов. Кроме того, выявленная пороговая чувствительность лиственницы к размеру частиц должна учитываться при выборе фракционного состава биотоплива.

Работа поддержана РНФ
(грант № 25-79-00127).

ДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВЫБРОСЫ ПРИ СЖИГАНИИ БИОМАССЫ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ

Белявская П.В.¹, Щинников П.А.²

¹ Kraftanlagen Energies & Services SE, Hansastrasse 23, 80686 München, Germany

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

В работе исследуется влияние предварительной термохимической подготовки кородревесных отходов (КДО) различной влажности (30–70%) на экологические и энергетические характеристики процесса сжигания в кипящем слое. Высокая влажность топлива приводит к снижению температуры слоя до 750–800 °С, росту выбросов СО (до 500–800 мг/нм³) и необходимости использования дополнительного топлива для стабилизации горения [1, 2].

Применение предтопка обеспечивает частичную газификацию топлива и формирование горючей газовой смеси, что позволяет повысить температуру слоя до 850–900 °С и обеспечить устойчивое горение без подсветки.

Тепловой баланс процесса описывается:

$$Q_{in} = Q_{полезн} + Q_{потери}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_{потери}}{Q_{in}}$$

При увеличении влажности возрастает доля тепла на испарение влаги:

$$Q_{исп} = W \cdot r$$

Для анализа гидродинамики и процессов горения выполнено CFD-моделирование (ANSYS Fluent), основанное на решении уравнений сохранения массы и импульса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{F}$$

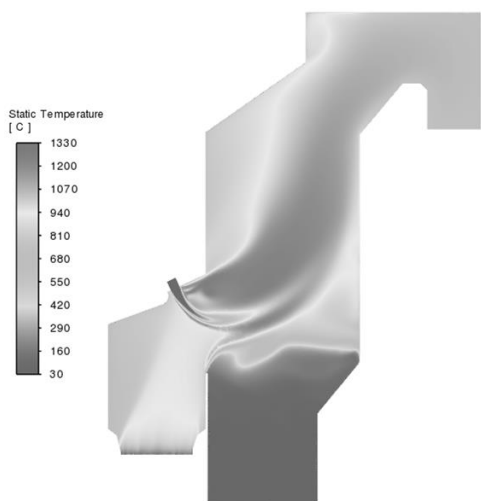
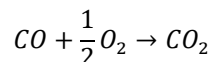


Рис. 1. Температура в продольной плоскости предтопка и топки котла КМ-75-40.

Установлено, что при скорости псевдоожижения $u_0 \approx 1.2$ м/с формируется устойчивая структура слоя с эффективным перемешиванием [3].

Образование оксида углерода определяется кинетикой неполного окисления:



Скорость образования СО может быть представлена как:

$$m_{\dot{CO}} \sim \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

- Результаты расчетов показали:
- снижение выбросов СО до 50–150 мг/нм³
- снижение NO_x до 120–180 мг/нм³
- повышение КПД с 84–85% до 87–88%
- повышение температуры слоя до 850–900 °С

Предварительная газификация высоковлажных кородревесных отходов в предтопке кипящего слоя обеспечивает стабилизацию теплогидродинамических условий процесса, повышение температуры слоя и снижение выбросов загрязняющих веществ. CFD-моделирование подтверждает, что равномерность температурного поля и интенсивность перемешивания являются ключевыми факторами, определяющими уровень выбросов СО и NO_x.

Список литературы:

1. Белявская П.В., Щинников П.А. Экологическая эффективность газификации кородревесных отходов различной влажности в предтопке кипящего слоя // Вестник ИГЭУ. 2026. № 1. С. 12–20.
2. Басыров А.Н., Кутателадзе С.С. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожиженных слоях. Новосибирск: Наука, 1980. 296 с.
3. Basu P. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Oxford: Academic Press, 2010. 376 p.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЧАСТИ ТЕХНОЛОГИЙ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ

Васильев А.Ю.

ФАУ "Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова",
Авиамоторная ул. 2, Москва, 111116, Россия

Современные газотурбинные двигатели гражданской авиации – это сверхсложные машины, конструкция которых базируется на технологиях, основанных на самых передовых достижениях науки и техники. В целом, тенденции развития гражданских авиационных двигателей схожи во всем мире: повышение степени сжатия и двухконтурности; улучшение показателей по топливной экономичности; более развитые схемы интеграции с планером самолета; обеспечение низкой эмиссии вредных веществ и др.

Степень совершенства современных газотурбинных двигателей такова, что даже имея в своем распоряжении большинство инструментов шестого технологического уклада, добиться значительного повышения основных характеристик двигателя становится всё сложнее. При этом количественный показатель улучшения характеристик прирастает малыми шагами, а количество вкладываемых в достижение сил и средств увеличивается кратно.

На сегодняшний день в авиационной отрасли России применяются практически все передовые технологии. Так, например, с помощью 3D печати изготавливаются не только отдельные элементы камеры сгорания, такие как: воздушные завихрители, диффузоры сложной формы, но и жаровые трубы с системой охлаждения в целом.

Наряду с этим, применение элементов искусственного интеллекта позволяет ускорить проведение расчетно-конструкторских работ, а использование методов машинного обучения проведение экспериментальных исследований отдельных узлов и авиационного двигателя в целом.

Использование современных материалов и покрытий позволяет обеспечить недостижимые ещё в недавнем прошлом характеристики с учетом повышения температур газа и степени сжатия.

Таким образом, можно предположить, что в ближайшие годы, например, на рубеже 2030 годов будет достигнут некий предел развития. Дальнейшее улучшение потребует значительных средств и усилий, не оправдывающих получаемый прирост. Необходимо будет искать нестандартные схемы работы двигателей, а с точки зрения сжигания топлив нестандартные топлива для них.

На сегодняшний день можно выделить три наиболее перспективных направления дальнейшего развития.

1) широко используемые уже сейчас биотоплива, для снижения суммарного выброса вредных веществ за жизненный цикл.

2) согласующийся с постулатами 6 технологического уклада, переход на сжигание в авиационных двигателях водорода.

3) переход в более отдалённой перспективе на использование топливных элементов.

Существующие характеристики топливных элементов и аккумуляторов не позволяют полностью сконцентрироваться на разработке электрических самолётов и их применении.

Применение биотоплив позволит получить основной эффект в области снижения суммарного выброса вредных веществ за жизненный цикл.

Следовательно, наиболее перспективным направлением развития в среднесрочной перспективе является перевод авиационных двигателей на использование водородного топлива. Дополнительно это позволит обеспечить соответствие двигателей перспективным экологическим стандартам планируемым к реализации ИКАО на рубеже 2030-2035 годов.

Рассмотрим более подробно сжигание водорода с целью снижения эмиссии вредных веществ.

Начиная с конца прошлого века нормируются выбросы несгоревших углеводородов; дыма; CO₂; NO_x и нелетучих частиц. Современные мировые тенденции обязывают ведущие фирмы ставить амбициозные цели по снижению эмиссии вредных веществ, согласующиеся с рекомендуемыми уровнями ИКАО. Так, например, фирма Rolls-Royce на конференции ISABE в Манчестере, озвучила свои цели по снижению эмиссии CO₂ и NO_x к 2030 году на 25 % и 60 % соответственно. Запланированные амбициозные цели лежат ниже средней линии тренда на графиках, т.е. в ближайшие десять лет необходимо обеспечить технологический прорыв в этих направлениях. В том же докладе фирмы Rolls-Royce, в одном ряду с технологиями виртуального двигателя, вентилятора с большой степенью двухконтурности, газогенератора улучшенной архитектуры, расположена технология малоэмиссионного сжигания топлива (технология бедного горения).

В ЦИАМ, к рубежу 2030-х годов планируется разработка технологии чисто бедного сжигания топлив в камерах сгорания авиационных ГТД. Такие схемы, обеспечивающие значительное снижение эмиссии вредных веществ, должны строиться на нескольких базовых технологиях. Новый тип камеры сгорания для двигателя 2030-х годов – многофорсунная КС: с сжиганием бедной смеси; 70-80 % воздуха подается через фронтное устройство КС; используются перспективные системы охлаждения (до 20 % расхода воздуха) и новые материалы стенок жаровой трубы; равномерность поля температур достигается за счет высокоэффективного смешения во фронтном устройстве; основных отверстий – нет.

Становится очевидным, что сегодня наряду с разработками в области совершенствования существующих конструкций авиационных двигателей и внедрением в производство альтернативных (SAF) топлив, необходимо интенсифицировать разработки в области сжигания водородных топлив.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ПРОТИВОТОЧНОМ ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ

Веретенников С.В., Благушин И.А.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
ул. Пушкина 53, г. Рыбинск, Ярославская область, 152934, Россия

Известно, что процесс горения сопровождается генерацией акустического шума. Горение в ограниченном пространстве сопровождается появлением дискретных максимумов звукового давления на частотном спектре, что связано с возникновением резонансных явлений. Предварительное смешение топлива и воздуха перед зоной горения приводит к появлению существенной термоакустической неустойчивости, которая влияет на устойчивость фронта пламени. Однако до настоящего времени точно неизвестно, каким образом сложная структура течения, акустическое излучение и геометрическая конфигурация камер сгорания будут влиять на форму фронта пламени, его устойчивость, полноту сгорания и эмиссионные характеристики.

Классическим подходом к интенсификации горения является закрутка потока, реализованная при помощи тангенциальных подводов, лопаточных завихрителей и др. В то же время противоточная структура закрученного течения, реализуемая, например, в вихревой трубе Ранка–Хилша, обеспечивает интенсификацию процессов смешения и стабилизацию фронта пламени за счет взаимодействия встречных приосевого и периферийного потоков. Известные исследования (аналитические, численные, экспериментальные) противоточных закрученных течений выявили влияние геометрических и режимных параметров на характеристики потока, наличие крупных спиральных вихревых структур и их нестационарность. Тем не менее, в литературе практически отсутствуют данные об акустическом шуме при реализации горения в таких течениях, а также влиянии внешнего акустического излучения на нестационарность фронта, что важно для оценки термоакустической неустойчивости и повышения эффективности горения.

Исследования выполнены на модели противоточного вихревого горелочного модуля с оптически прозрачной цилиндрической частью диаметром $d = 26$ мм, относительным радиусом сопла-диафрагмы $r_d/r = 0,8$. В ходе экспериментов варьировалась длина цилиндрического участка от 2,6 до 6 калибров. Выполнялась скоростная видеосъемка положения видимого фронта пламени и измерение акустического излучения при помощи микрофона ВС-501, расположенного на удалении 0,5 метров от среза сопла. Отклонение состава смеси от стехиометрического приводит к возрастанию неустойчивости процесса горения, фронт пламени испытывает значительные колебания и периодически проникает внутрь противоточной вихревой камеры, а периодически срывается с последующим самовоспламенением. Наблюдается вращение фронта пламени внутри горелочного устройства и его радиальные пульсации с частотой до 200 Гц, что связано с спиральным характером движения периферийного вихря и прецессией приосевого

потока. Наблюдаемые осевые пульсации положения фронта пламени с частотой 50-60 Гц появляются на бедном режиме горения и обусловлены периодическим проскоком фронта в зону обратных токов, формируемую в приосевой зоне противоточного закрученного течения. Увеличение числа Рейнольдса потока воздуха, а следовательно интенсивности закрутки потока, приводит к снижению частоты осевых пульсаций положения фронта пламени до 30-40 Гц, с повышением частоты радиальных пульсаций внутри противоточной вихревой камеры до 300 Гц. В целом этот режим характеризуется более устойчивым процессом горения.

При смене режима горения наблюдаются и изменения акустического излучения горелочного устройства. Причем на бедных режимах горения уровень шума в области частот менее 800 Гц возрастает в среднем на 30 дБ по сравнению с изотермическим течением.

Отмеченные ранее колебания положения фронта пламени на бедных режимах горения приводят к генерации шума в области низких (менее 800 Гц) и средних частот (от 1200 до 2500 Гц). При этом максимум уровня шума в области низких частот лежит в районе 160...300 Гц, что хорошо соотносится с частотой радиальных пульсаций фронта пламени в цилиндрической части противоточной вихревой камеры.

В дальнейшем выполнено изучение влияния на фронт пламени наложения внешнего акустического излучения в диапазоне частот от 20 до 1000 Гц. На бедных режимах горения наибольшее влияние на устойчивость фронта пламени оказывало наложение частот в диапазоне от 100 до 350 Гц. При акустическом воздействии частотами в диапазоне 200-250 Гц наблюдалось увеличение амплитуды колебания положения фронта пламени и его погасание. Увеличение частоты воздействия способствовало стабилизации положения видимой части фронта пламени и повышению устойчивости горения.

Список литературы:

1. Газодинамика и горение в противоточном закрученном течении / А. И. Гурьянов, О. А. Евдокимов, Ш. А. Пиралишвили и др. Рыбинск: РГАТУ им. П. А. Соловьева, 2022. 214 с.
2. Thirumalaikumarana S. K., Mohana B., Basua S. Effects of flame macrostructures on the combustion dynamics of novel counter-rotating radial swirl injector in a model can combustor // arXiv preprint arXiv:2506.20138. – 2025.
3. Sadanandan R., Stohr M., Meier W.. Взаимодействие поля течения и структуры пламени в осциллирующем вихревом пламени // Физика горения и взрыва. 2009. - Т. 45, № 5. - С. 16-28.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2026-0003).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ В ОБОГРЕВАЕМОМ СЕМИСТЕРЖНЕВОМ МАКЕТЕ ТВС С САМОДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИСЯ ТВЭЛАМИ**Вишняков Е.А., Сапогов А.В., Тутукин А.В.**

АО «НИКИЭТ» им. Н.А. Доллежала, Москва, Россия

В работе представлены результаты численного и экспериментального исследования локальных характеристик течения в геометрически подобном масштабном макете семистержневой тепловыделяющей сборки с электрообогреваемым крестообразным имитатором твэла. Основное внимание уделено верификационным расчетам, выполненным с использованием методов вычислительной гидродинамики.

Экспериментальная часть включала измерения полей скорости методом лазерной доплеровской анемометрии и температур с использованием термопар, расположенных по периметру имитатора твэла. Полученные данные использовались для верификации расчетной модели.

Численное моделирование неизотермического стационарного турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости выполнено в рамках RANS-подхода с применением различных моделей турбулентности. Теплофизические свойства воды задавались в зависимости от температуры по стандарту IAPWS-IF97. Расчетная сетка содержала порядка 40 млн ячеек. Рассмотрены шесть режимов течения, соответствующих различным значениям числа Рейнольдса.

По результатам моделирования наибольшее совпадение с экспериментальными данными получено на

k- ω SST модели турбулентности. Максимальное отклонение расчетных значений продольной компоненты скорости от экспериментальных данных не превышает 20 %, тогда как среднее отклонение составляет менее 7 %. Наличие настолько больших максимальных отклонений обусловлено сложностью экспериментального измерения скорости в пристеночной области данной геометрии имитаторов, а также их точного позиционирования.

Расчет температурного напора на поверхности имитатора твэла демонстрирует хорошее согласование с экспериментом: максимальное отклонение не превышает 10 %, среднее — около 7 %. Это подтверждает корректность применяемых подходов к моделированию теплообмена.

Результаты работы подтверждают применимость используемых моделей турбулентности для инженерных расчетов течений в каналах сложной геометрии. Существенные расхождения наблюдаются в области гидродинамического пограничного слоя, что обусловлено высокими градиентами скорости и особенностями используемых моделей турбулентности, а также методами экспериментального измерения.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНОГО ПОЛИМЕРНОГО СЛОЯ ЛИТИЙ-ИОННОЙ БАТАРЕИ ПРИ НАЛИЧИИ СКВОЗНЫХ ПРОКОЛОВ

Журавлев Д.В., Сайфуллин Д.Д., Васильков С.А., Чирков В.А., Елагин И.А., Алексеева Е.В., Левин О.В.

Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская набережная 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

Введение. Крайне важным аспектом при производстве литий-ионных аккумуляторов является обеспечение безопасности, поскольку короткое замыкание является одним из основных факторов, способных привести к интенсивному тепловыделению, перегреву и тепловому разгону элемента питания [1]. Одним из подходов, позволяющих уменьшить выделение тепла, является введение между катодом и токосъёмником дополнительного защитного полимерного слоя. В нормальном режиме работы такой слой обладает низким сопротивлением и практически не препятствует протеканию тока, однако при выходе напряжения или температуры за допустимые пределы переходит в высокоомное состояние, ограничивая ток и связанное с ним тепловыделение [2].

Идеальная структура защитного слоя приводит к обеспечению безопасности аккумулятора при коротком замыкании. Однако при наличии производственных дефектов частицы материала положительного электрода могут локально протыкать защитный слой, формируя сквозные проколы, заполненные проводящим материалом катода. Такие проколы создают прямой электрический контакт между катодным материалом и токосъёмником и могут снижать эффективность защитного слоя. Цель данного исследования: определить требования к качеству защитного слоя, которые будут достаточны для предотвращения перегрева аккумулятора, то есть определить допустимые размеры и плотность сквозных проколов в защитном слое, при которых ячейка аккумулятора не будет перегреваться свыше допустимого значения температуры. Для симуляции процесса разряда батареи при коротком замыкании и анализа процесса нагрева ячейки применено численное моделирование с использованием различных конфигураций соотношения размеров и плотности дефектов защитного слоя.

Результаты. Численная модель для расчёта короткого замыкания представляет собой однонаправленную сопряжённую задачу. На первом этапе проводится моделирование процессов токопрохождения в ячейке, а именно в одном элементарном объёме, ограниченном двумя токосъёмниками и включающим один дефект (отверстие) полимерного слоя. Переходный электрохимический процесс рассчитывается в рамках модели пористого электрода Ньюмана [3] при помощи сопряжённой системы уравнений, включающей закон сохранения массы ионов лития в электродах, законы сохранения заряда для твёрдой и жидкой фаз, а также уравнение Батлера–Фольмера для описания переноса заряда между этими фазами. Получаемая в результате расчёта зависимость средней мощности тепловыделения от времени передаётся во вторую модель, геометрия которой представляет собой полный аккумулятор с однородными (приведёнными) теплофизическими свойствами.

Расчёты показывают, что подавляющая доля тепла выделяется в окрестности прокола, а именно в области, где сходятся линии тока. Это происходит на протяжении всего времени разрядки, несмотря на то что сама область прокола разряжается в самом начале. Твёрдая фаза в отверстии (кобальтат) после разрядки остаётся выступать в роли резистора, на котором из-за высокой плотности тока, текущего из электрода в коллектор, выделяется большое количество тепла. Так, до полной разрядки ячейки, температура достигает максимального установившегося значения за 10–1000 секунд, при этом значения этой температуры сильно варьируются в зависимости от диаметра прокола и размера моделируемой области в первом этапе (который определяется исходя из плотности расположения проколов в защитном слое).

Варьирование параметров системы показывает, что максимальная (установившаяся) температура сильно коррелирует с максимальным (начальным) током через ячейку. Также скорость разрядки, максимальный ток и максимальная температура перегрева ячейки возрастают с ростом доли площади отверстий, то есть как с увеличением плотности расположения проколов, так и с ростом их диаметра. При этом более опасными в контексте перегрева являются более мелкие проколы: например, для сохранения перегрева менее 75 °С относительно температуры окружающей среды, доля площади для проколов с радиусом 1 мкм должна составлять не более 0.0002% от всей площади защитного слоя, в то время как для радиуса 30 мкм доля может быть увеличена до 0.002%.

Выводы. Разработана численная модель, которая позволяет проводить анализ нагрева ячейки аккумулятора в процессе короткого замыкания для неидеального (имеющего сквозные отверстия, заполненные материалом электрода) защитного слоя. Получена зависимость локального перегрева от доли площади проколов в защитном слое. При этом при равной полной площади более мелкие проколы приводят к более сильному нагреву, являясь тем самым более опасными в контексте безопасности.

Список литературы:

1. Liu B., Jia Y., Li J., Yin S., Yuan C., Hu Z., Wang L., Li Y., Xu J. Safety issues caused by internal short circuits in lithium-ion batteries // J. Mater. Chem. A. 2018. V. 6, N 43. P. 21475–21484.
2. Beletskii E.V., Volkov A.I., Alekseeva E.V. et al. Potential-controlled switchable-resistance polymer layer for enhanced safety of lithium-ion batteries with NMC-type cathodes // ACS Appl. Energy Mater. 2023. V. 6, N 21. P. 11242–11254.
3. Fuller T.F., Doyle M., Newman J. Simulation and optimization of the dual lithium ion insertion cell // J. Electrochem. Soc. 1994. V. 141, N 1. P. 1–10.

*Исследование проведено в рамках проекта ЕГИСУ
НИОКТР 126022017737-2.*

ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ БЕЗУГЛЕРОДНОГО ТОПЛИВА В ПРОТИВОТОЧНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Иванов Р.И., Евдокимов О.А., Гурьянов А. И.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
ул. Пушкина 53, Рыбинск, 152934, Россия

Мы живем в эпоху, когда климатические изменения становятся все более ощутимыми. Таяние ледников, экстремальные погодные явления, повышение уровня моря – все это тревожные сигналы, которые нельзя игнорировать. Основной причиной наблюдаемых трансформаций является сжигание ископаемого топлива, что приводит к масштабным выбросам углекислого газа и других парниковых газов в атмосферу. Именно поэтому переход на безуглеродное топливо – это не просто модный тренд, а жизненная необходимость для сохранения нашей планеты и обеспечения благополучия будущих поколений.

В поисках альтернатив ископаемому топливу, которые бы не вредили нашей планете, ученые всего мира активно исследуют новые источники энергии. И среди них особое место занимает аммиак. На первый взгляд, это вещество может ассоциироваться с резким запахом и промышленными процессами, но на самом деле аммиак обладает огромным потенциалом стать одним из ключевых игроков в переходе к безуглеродной энергетике.

Авторами предложена технология сжигания чистого аммиака в воздухе с использованием противоточного закрученного течения. На первом этапе проведено детальное исследование взаимосвязи между газодинамическими и геометрическими параметрами горелочного устройства и его рабочим процессом, что позволило разработать конкретные рекомендации для проектирования и расчёта горелок, предназначенных для сжигания аммиака [1]

Дальнейшие исследования были направлены на анализ влияния схемы организации процесса горения. Для этого использовались различные комбинации подачи топлива, изменялся механизм организации течения в горелочном устройстве. В результате исследований выявлено, что только два основных режима горения обладают существенными преимуществами: это классическое диффузионное горение и метод сжигания, основанный на предварительном смешивании топлива с воздухом (рисунок 1). Особый интерес представляет тот факт, что при изучении горения аммиака в режиме предварительного смешивания было обнаружено четыре режима горения аммиака: внешнее горение, переходный режим, комбинированное горение и внутреннее горение.

В ходе изучения методов интенсификации горения безуглеродного топлива выявлены два наиболее перспективных направления: разбавление топлива углеводородами и модификация окислителя. Первый метод признан менее целесообразным из-за нарушения углеродной нейтральности. Второй метод продемонстрировал значительное расширение области устойчивой работы при увеличении концентрации кислорода в воздухе всего на 1% (рисунок 2).

Проведено исследование горелочного устройства, работающего в условиях ограниченного объема. Отличительной особенностью данного режима является отсутствие свободного истечения продуктов сгорания в атмосферу, что исключает возможность эжекции атмосферного воздуха. Обнаружены критические параметры ограничительного объема, при которых нарушается работа горелочного устройства.

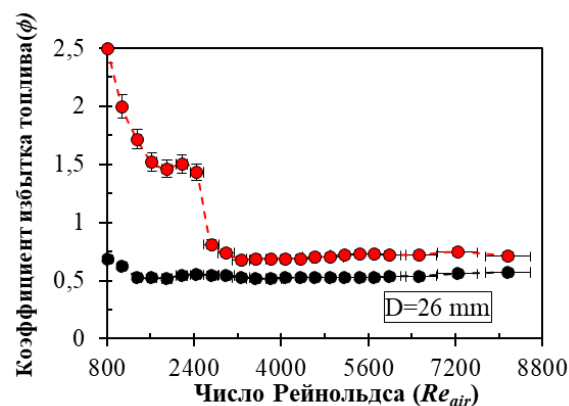


Рис. 1 Границы богатого и бедного срыва пламени аммиака при организации предварительного смешения

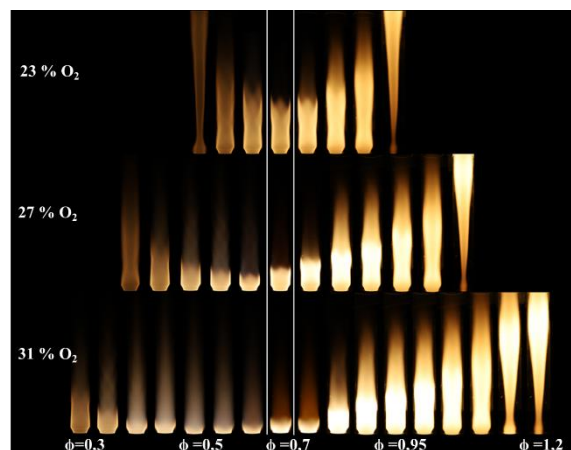


Рис. 2 Карта режимов горения аммиака в противоточном закрученном течении при различном процентном содержании кислорода в воздухе

Список литературы:

1. Ivanov, R.I., Evdokimov, O.A., Gur'yanov, A.I. et al. An Experimental Study of Ammonia Stable Combustion Modes in a Bidirectional Swirling Flow. J Appl Mech Tech Phy 66 (Suppl 1), S10–S18 (2025). <https://doi.org/10.1134/S0021894425700774>

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований (шифр научной темы FSSG-2026-0003)

МИКРОВОЛНОВЫЙ СПОСОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОВЗРЫВНОГО РАСПАДА КАПЕЛЬ

Ковалев Д.Н., Антонов Д.В.

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

Феномен микровзрывной фрагментации композиционных капель востребован в технологиях синтеза наночастиц, распылительной сушки, термической очистки жидкостей [1] и сжигания топлив. Ключевым фактором, определяющим характер процесса, выступает уровень перегрева легколетучего низкокипящего компонента (чаще воды), достигающий 200 К относительно равновесной температуры кипения [2]. При малых перегревах (до 50 К) доминирует гетерогенная нуклеация на готовых центрах (неровностях межфазной границы, примесях, газовых включениях); при перегревах свыше 100 К – гомогенная нуклеация флуктуационной природы. Наименее изученной остаётся переходная область, характерная для сжигания топлива в газотурбинных установках и двигателях. Повышение тепловой мощности таких установок возможно за счёт дополнительного микроволнового нагрева камеры сгорания, усиливающего тепловое воздействие на капли; при этом наличие диэлектриков с высокой проницаемостью (например, воды) обеспечивает прямо пропорциональный рост эффективности преобразования излучения в тепло относительно их диэлектрической проницаемости.

Режимы паффинга и микровзрыва представляют собой два контрастных сценария фрагментации композиционной капли, инициируемых интенсивным подводом теплоты. Паффинг определяется как локальное вскипание ограниченной части объёма капли, сопровождающееся отрывом от её поверхности небольшого (до 10) числа вторичных фрагментов, диаметр которых превышает 300 мкм. Микровзрыв, напротив, есть полный распад перегретого до метастабильного состояния объёма капли, приводящий к формированию аэрозольного облака. Оба явления реализуются в композиционных каплях, где дисперсная фаза представлена легколетучим низкокипящим компонентом (вода, фреоны, кислоты, эфиры, спирты), а несущая среда – высококипящим компонентом (углеводородные топлива, жидкие металлы) [3, 4].

Характер протекания и конечные результаты фрагментации критически зависят от физико-химических свойств дисперсной и несущей сред, а также от критических условий интенсивного подвода теплоты к композиционным каплям и их исходной формы. Вследствие этого регистрируются разномасштабные последствия распада с контрастно различающимися радиусами, количеством, скоростями и траекториями движения вторичных фрагментов [5]. Так, если в режиме паффинга образуются единичные относительно крупные капли, движущиеся по направлению от поверхности, то микровзрыв генерирует многочисленные мелкодисперсные частицы, формирующие расширяющееся аэрозольное облако со стохастическим распределением траекторий.

Для достоверного описания динамики процессов микровзрыва и паффинга необходима физическая модель, в явном виде учитывающая ключевые факторы (см. рис. 1), среди которых – теплофизические и межфазные характеристики компонентов, темп нагрева, начальная температура и размер капель, а также условия перехода дисперсной фазы в метастабильное состояние.

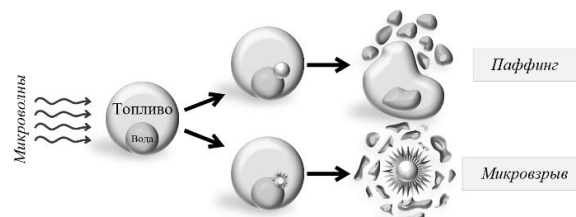


Рис. 1 – Физическая модель микровзрывной фрагментации двухжидкостной капли

Для обобщения результатов и выявления универсальных закономерностей использован метод подобия. На его основе введён безразмерный критерий T_m , который связывает характерное время задержки распада с ключевыми теплофизическими свойствами дисперсной и несущей сред, а также с темпом подвода теплоты. Данный критерий отражает баланс между скоростью поступления энергии в каплю и способностью перегретой жидкости релаксировать к равновесию, что позволяет количественно разграничить условия, ведущие к взрывному распаду и режиму паффинга, и тем самым служит инструментом прогнозирования сценария фрагментации. Для более полного учёта гидродинамических и тепловых факторов дополнительно рассмотрены характерные диапазоны изменения классических чисел подобия – Фурье, Вебера, Лапласа и Онезорге, что даёт возможность совместно с критерием T_m корректно выбрать области реализации различных механизмов распада композиционных капель.

Список литературы:

1. D.V. Antonov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak, Characteristics of the Child-Droplets Emerged by Micro-Explosion of the Heterogeneous Droplets Exposed to Conductive, Convective and Radiative Heating, *Microgravity Sci. Technol.* 31 (2019) 541-555.
2. P. Skripov, T. Bar-Kohany, D.V. Antonov, P.A. Strizhak, S.S. Sazhin, Approximations for the nucleation temperature of water, *Int. J. Heat Mass Transf.* 207 (2023) 123970.
3. D. V. Antonov, M. V. Piskunov, P.A. Strizhak, Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions, *Int. J. Therm. Sci.* (2019).
4. D.V. Antonov, R.M. Fedorenko, O.V. Vysokomornaya, L.S. Yanovsky, P.A. Strizhak, The relationship between these temporal characteristics of micro-explosive breakup of water/fuel composite droplets and the ambient gas temperature, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 164 (2025) 108896.
5. D.V. Antonov, R.M. Fedorenko, P.A. Strizhak, Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets, *Appl. Therm. Eng.* (2019).

Работа поддержана РФФ
(грант № 24-79-10031).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ГИДРИДА МАГНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**Кудняров В.Н., Эльман Р.Р., Курдюмов Н.Е.**

Томский политехнический университет

В условиях роста потребления энергоресурсов и ужесточения экологических требований водородная энергетика рассматривается как одна из ключевых технологий будущего. Ценность водорода как энергоносителя заключается в его аккумулирующей способности, что позволяет сглаживать суточные и сезонные колебания генерации возобновляемых источников энергии. В ближайшей перспективе особую актуальность приобретают системы накопления водорода средней и малой мощности для обеспечения бесперебойного энергоснабжения объектов I категории надежности, таких как вышки сотовой связи и телекоммуникационное оборудование.

Практическая реализация водородной энергетики сталкивается с рядом технических вызовов, среди которых ключевым является организация надежного и безопасного хранения водорода. Твердофазное хранение в металлгидридных материалах является одним из наиболее перспективных способов аккумулирования водорода. Данный подход обеспечивает объемную плотность хранения, сопоставимую с плотностью жидкого водорода, при существенно более низких рабочих давлениях. Среди многообразия материалов гидрид магния MgH_2 выделяется максимальной теоретической емкостью (7,6 масс. % H_2), доступностью сырья и низкой стоимостью. Однако высокая термодинамическая стабильность, вынуждающая подводить тепло при температуре выше 300 °C для инициирования реакции сорбции и десорбции, а также медленная кинетика данных процессов ограничивает его практическое применение.

Для практической реализации металлгидридных систем хранения водорода определяющее значение приобретает организация теплового менеджмента. Процесс зарядки сопровождается выделением тепла, которое необходимо эффективно отводить для предотвращения перегрева реакционной зоны и замедления реакции. Процесс разрядки требует непрерывного подвода тепловой энергии для обеспечения требуемой скорости выделения водорода. В условиях низкой теплопроводности металлгидридной засыпки возникают значительные температурные градиенты, приводящие к неравномерному протеканию реакции по объему реактора и снижению динамических характеристик системы. Таким образом, оптимизация теплового менеджмента является ключевой задачей при проектировании эффективных металлгидридных накопителей водорода.

Для решения указанных задач в настоящей работе разработана математическая модель металлгидридной системы хранения водорода на основе композиционного материала на основе гидрида магния с добавлением никеля и углеродных нанотрубок (УНТ).

Выбор УНТ в качестве функциональной добавки обусловлен их уникальными теплофизическими свойствами. Так теплопроводность индивидуальных нанотрубок может достигать 3000 Вт/м·К, что при формировании разветвленной теплопроводящей сети в объеме порошковой засыпки позволяет многократно повысить эффективную теплопроводность композита. Никель является эффективной каталитической добавкой, способной повысить эффективность и стабильность работы системы. Модель реализована в среде конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics 6.4 и учитывает взаимосвязанные процессы тепломассопереноса в пористой среде, скорость зарядки и разрядки металлгидридной системы хранения водорода на основе гидрида магния, никеля и углеродных нанотрубок, а также влияние конструктивных параметров теплообменной системы.

Геометрия моделируемого реактора представляет собой цилиндрическую камеру с рабочим объемом, заполненным порошком композиционного материала. Корпус реактора и теплообменные элементы изготовлены методами аддитивных технологий, что открывает возможности для создания сложных внутренних структур, недоступных при традиционных способах производства.

Проведены вычислительные эксперименты по моделированию процессов абсорбции и десорбции водорода для различных конфигураций реактора. Исследовано влияние количества и геометрии теплообменных ребер на распределение температуры и концентрации водорода в объеме засыпки. Показано, что добавление углеродных нанотрубок и никеля в состав металлгидридной засыпки приводит к повышению теплопроводности композита и общей эффективности работы системы.

Осуществлена верификация разработанной математической модели путем сопоставления расчетных результатов с экспериментальными данными, полученными на лабораторной установке. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало их удовлетворительное согласие, что подтверждает адекватность разработанной модели.

Полученные результаты создают научную основу для проектирования высокоэффективных систем твердофазного хранения водорода на основе гидрида магния с улучшенными теплофизическими характеристиками. Практическая значимость работы заключается в применении разработанных подходов при создании эффективных накопителей водорода и систем хранения энергии на их основе.

*Работа поддержана РНФ
(грант № 25-79-10009).*

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ ВУТ НА МОДЕРНИЗИРОВАННОМ КОТЛЕ К-50-40/14

Кузнецов В.А.^{1,2,3}, Дектерев А.А.^{1,2,3}, Кравченко И.В.⁴, Мальцев Л.И.^{1,2}, Алексеенко С.В.^{1,2}

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

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

³ Сибирский федеральный университет,
пр. Свободный 79, Красноярск, 660041, Россия

⁴ ООО "ПРОТЭН-ИНЖИНИРИНГ",
ул. Попова 35Б, Бердск, 633011, Россия

Технология сжигания угля в виде ВУТ является одной из самых экологически чистых, экономически выгодных и перспективных. К прямому влиянию на снижение экологического воздействия на окружающую среду при сжигании ВУТ можно отнести более полное выгорание углерода топлива по сравнению с другими технологиями и снижение вредных газообразных выбросов. Технология позволяет использовать для приготовления ВУТ низкокалорийные и тощие угли и отходы углеобогащения, а также создавать на их основе композиционные водо-торфо-угольные, водо-нефте-угольные и др. топливные составы.

Наличие высокого содержания влаги в ВУТ затрудняет его воспламенение. Поэтому для внедрения технологии сжигания ВУТ на котлах необходимо использовать специальные условия, позволяющие стабилизировать процесс воспламенения и горения. Одним из способов снижения времени воспламенения является повышение температуры в зоне подачи топлива. Для этого необходимо создать процесс горения близкий к адиабатному. В работах [1,2] показана эффективность использования данного подхода для стабилизации воспламенения ВУТ.

В данной работе была предложена схема для внедрения технологии сжигания ВУТ на котле К-50-40/14. Для этого котел был оборудован дополнительным муфельным предтопком (см. рис. 1). Таким образом в первой камере будет осуществляться стабильное воспламенение ВУТ, а в основной камере – дожигание топлива и снятие тепла через поверхности теплообмена. Для обеспечения высоких экономических характеристик работы котла, в его конструкции предусмотрено наличие воздухоподогревателя и системы жидкого шлакоудаления. Топливо в топку подается пневматическими форсунками, имеющими хорошие показатели эффективности и надежности в работе.

Так как данная компоновка котла предлагается впервые, поэтому актуальной задачей является исследование процессов тепломассообмена и горения ВУТ в котле, при этом возникает необходимость оптимизации геометрии топочной камеры и взаимного расположения ее основных узлов, обеспечивающих циркуляцию горячих горючих газов в зоне воспламенения, исследование аэродинамики и распределения температур в топке котла, поиск оптимальных режимных параметров. Для исследования процессов сжигания ВУТ на модернизированном котле К-50-40/14 была использована численная методика, предложенная в работах [3,4].

Целью настоящей работы является совершенствование технологии капельно-факельного сжигания водоугольной суспензии в модернизированном котле К-50-40/14 на основе математического моделирования.

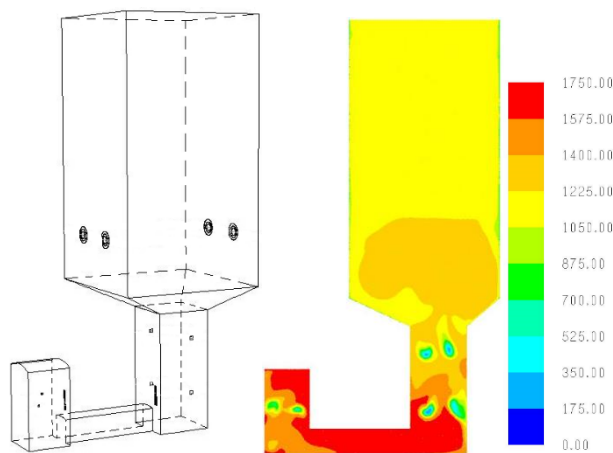


Рис. 1. Модернизированный котел К-50-40/14 (схема котла и температурное поле).

В работе были получены результаты численного исследования процессов горения ВУТ в модернизированном котле К-50-40/14. Установлена зависимость характеристик работы котла от режимных параметров. Показано, что надежным параметром, позволяющим выбирать температурный режим, является коэффициент избытка воздуха.

Список литературы:

1. Alekseenko S.V., Kuznetsov V.A., Maltsev L.I., Dekterev A.A., Chernetskiy M.Yu. Analysis of combustion of coal-water fuel in low-power hot-water boiler via numerical modeling and experiments. Journal of engineering thermophysics. Vol. 28. Is. 2. 177-189.
2. Alekseenko, S.V. et al., Results of Pilot-Operation Combustion of Coal-Water Fuel in Low-Power HotWater Boiler, Izv. Tomsk Politekh. Univ. Inzhin. Geosurs., 2017, vol. 328, no. 12, pp. 16-28.
3. Kuznetsov V.A., Bozheeva D.M., Minakov A.V. Numerical study on processes of oxy-fuel combustion of coal-water slurry in the furnace chamber. Fuel. Vol. 371. 2024.
4. Kuznetsov V.A., Bozheeva D.M., Minakov A.V. Numerical study of oxy-flame-droplet combustion of suspension fuel prepared from waste. Applied Thermal Engineering. Vol. 289. 2026.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 25-79-30002,
<https://rscf.ru/project/25-79-30002/>

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ОСТРОВА ТЕПЛА НАД КРАСНОЯРСКОМ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОЙ ИНВЕРСИИ

Литвинцев К.Ю.^{1,2}, Дектерев Д.А.^{1,2}, Сентябов А.В.², Финников К.А.², Лобасов А.С.^{1,2}

¹ Институт биофизики СО РАН, ул. Академгородок 50 стр. 50, 660036, Красноярск, Россия

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

Экологическое состояние атмосферы городов определяется техногенными факторами, такими как источники загрязнений и организация застройки, и природными, такими как: климат, погода и ландшафт. Набор данных факторов определяет уникальность экологических проблем каждого города. Для города Красноярска источниками загрязняющих веществ и антропогенного тепла являются: автотранспорт, промышленные предприятия и теплоэнергетические объекты, как в виде крупных ТЭЦ, так и в виде автономных источников тепла (частный сектор). В зимнее время мощным тепловым источником, который оказывает существенное влияние на городскую атмосферу и распространение выбросов, является река Енисей, незамерзающая вследствие техногенного воздействия [1, 2]. Основными природными факторами, определяющими формирование режима неблагоприятных метеоусловий, являются: расположение значительной части города в речной долине между двумя возвышенностями, низкие скорости ветра (условия близкие к штилевым) и наличие устойчивой атмосферной инверсии оседания. В результате над городом может формироваться тепловой купол, препятствующий выносу загрязнений за пределы города. Наиболее часто неблагоприятные условия формируются в зимнее время, как из-за повышенной активности теплоэнергетических объектов, особенно частного сектора, так и частого формирования мощной атмосферной инверсии над городом.

Для исследования формирования теплового купола и анализа способов выноса загрязняющих веществ из городской атмосферы в условиях тепловой инверсии Красноярска разрабатывается гидродинамический стенд (Рис. 1). В стенде имитируется ландшафт, характерный для г. Красноярск: источник городского тепла и река Енисей, расположенные в долине между возвышенностями. Размеры рабочей зоны стенда составляют 180 см в длину, 80 см в ширину и 30 см в высоту. По всей длине стенда располагаются возвышенности высотами 4 см и 8 см, имитирующие холмы на левом и правом берегах соответственно. У подножья правого склона расположен продольный тепловой источник шириной 5 см моделирующий реку. В центре рабочей области, между возвышенностями, расположен тепловой источник шириной 40 см и длиной от 40 см до 80 см, моделирующий город.

Для оценки тепловых и гидродинамических параметров стенда было проведено предварительное CFD моделирование. В качестве начального распределения температурной инверсии по высоте задавался градиент 200 К/м. На верхней и нижней поверхностях задавались изотермические условия с температурами 353 К и 293 К, соответственно. На возвышенностях и склонах также ставились изотермические условия в

соответствии с начальным градиентом температуры. Таким образом, общий перепад температур в стенде составлял 60 К на 30 см высоты. Для областей, имитирующих город и реку задавались различные варианты температур, превышающие температуру нижней поверхности, в диапазоне от 5 К до 20 К.

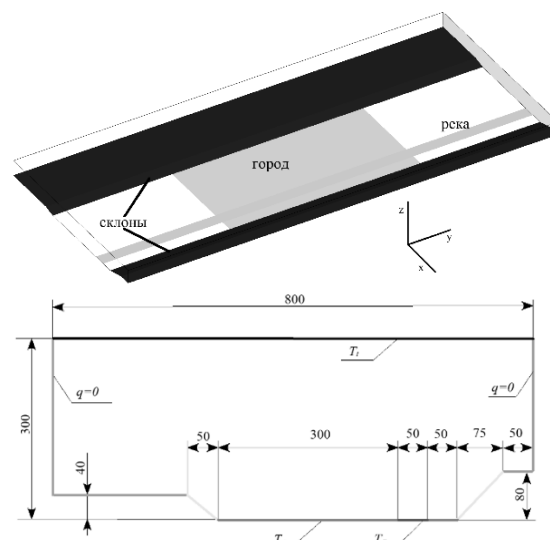


Рис. 1. Схема стенда

Расчетные исследования для условий гидродинамического стенда при наличии температурной инверсии показали возможность формирования городского купола тепла с устойчивыми возвратными течениями, препятствующими выносу «загрязняющих» веществ из области над поверхностью города (Рис. 2). Важно отметить, что наиболее неблагоприятные условия формируются в случае, когда высота купола не превышает окружающих возвышенностей. Также наблюдается значительное влияние реки на форму купола.



Рис. 2. Изоповерхность концентрации пассивного скаляра через 1200 секунд после «включения» источников тепла

Список литературы:

1. Hrebtov M., Hanjalić K. Numerical Study of Winter Diurnal Convection Over the City of Krasnoyarsk: Effects of Non-freezing River, Undulating Fog and Steam Devils // Boundary-Layer Meteorol., 2017. Vol. 163, P. 469–495.
2. Filimonov S.A., Dekterev A.A., Gavrilov A.A., Litvintsev K.Yu., Shebelev S.V., Meshkova V.D. The influence of landscape and urban development on modeling of transport of pollutants in Krasnoyarsk city // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 012134.

Работа выполнена в рамках Договора НИР №ДПЮ-25-08/24 от 29 августа 2025 г.

УПРАВЛЕНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ ТЕЧЕНИЕМ В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ: МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ И АНАЛИЗ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

Лутченко И.И.^{1,2}, Палкин Е.В.¹, Мулладжанов Р.И.^{1,2}, Алексеенко С.В.^{1,2}

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

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

Течения с закруткой находят широкое применение в газотурбинных двигателях [1]. В частности, в камерах сгорания это способствует эффективному зажиганию топливно-воздушной смеси и стабилизации пламени благодаря формированию сложной вихревой структуры, включающей центральную и внешнюю зоны рециркуляции. Однако, наряду с положительными эффектами интенсивная закрутка потока может приводить к развитию в потоке глобальной гидродинамической неустойчивости – прецессирующее вихревое ядро (ПВЯ). Динамика ПВЯ может вызывать нежелательные пульсации давления, усиливая тепловые нагрузки вследствие резонансных эффектов [2]. В связи с этим разработка эффективных методов подавления ПВЯ является актуальной задачей.

В данной работе предлагается подход к управлению изотермическим течением в модельной камере сгорания, основанный на теории гидродинамической устойчивости. Для азимутального волнового числа $m = 1$ решаются уравнения Навье–Стокса на когерентную компоненту потока в прямой и сопряжённой постановках, что позволяет получить соответствующие моды. Их пересечение формирует поле структурной восприимчивости, которое указывает область потока, где локальное воздействие наиболее сильно влияет на контур обратной связи, поддерживающий зарождение ПВЯ. На основе этой информации выбирается оптимальное положение для кольцевой инжекции воздуха. Затем предсказания линейной теории проверяются с помощью численного моделирования методом крупных вихрей (LES), в рамках которого проводится параметрическое исследование влияния положения слота инжекции и величины расхода.

Глобальный линейный анализ устойчивости выполнен на осреднённом по времени течении, полученном из LES расчетов. Турбулентная вязкость учитывается в модифицированных уравнениях в модуле DOG открытого пакета Semtex [3]. В результате выявлена мода ПВЯ с частотой $\omega_p D / 2\pi U_b = 0.76$, что хорошо согласуется с данными LES. Построена карта структурной восприимчивости с максимальным значением (wavemaker) в области отрыва потока.

Для подавления ПВЯ проведена серия LES с постоянной инжекцией воздуха через кольцевой слот на сопле. Расход инжекции варьировался от 2 до 8% от входного расхода, а положение слота выбиралось в трёх точках: непосредственно в wavemaker x_0 , выше

по потоку x_1 и ниже x_2 . При инжекции в x_0 уже при 4% расхода эффективность подавления достигает насыщения (около 50% снижения пульсаций давления), и дальнейшее увеличение расхода не даёт прироста. Поле вариации давления при этом равномерно подавлено, а его пик смещается от стенки сопла. Для положений x_1 и x_2 наблюдается монотонная зависимость от расхода: при 8% подавление достигает 70–80%. Это объясняется тем, что при таком высоком расходе инжекция, даже находясь за пределами wavemaker, оказывает существенное влияние на среднее течение в области наибольшей структурной восприимчивости.

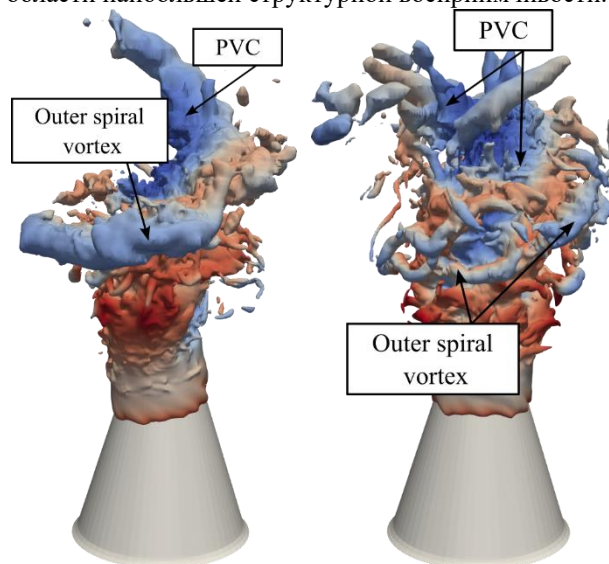


Рис. 1. Изоповерхности давления в случае без управления (слева) и при инжекции в положении wavemaker (справа).

Список литературы:

1. Введение в теорию концентрированных вихрей / С.В. Алексеенко, П.А. Куйбин, В.Л. Окулов; Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2003. 503 с.
2. Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems //Progress in Energy and Combustion Science. 2006. Т. 32. No. 2. С. 93-161.
3. Barkley D., Blackburn H. M., Sherwin S. J. Direct optimal growth analysis for timesteppers //International journal for numerical methods in fluids. 2008. Т. 57. No. 9. С. 1435-1458.

Работа поддержана РФФ
(грант № 25-79-30002).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА НА БИОКЛИМАТИЧЕСКИЙ КОМФОРТ В ГОРОДСКИХ МОРФОТИПАХ В РАЗНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОЯСАХ

Мешкова В.Д.^{1,2}, Шульженко П.Д.¹, Дектерев А.А.^{1,2}, Минаков А.В.¹

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

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

Активная урбанизация современных городов показала, что используемые подходы по организации внутригородской жизни привели к формированию неблагоприятных условий внешней среды, тем самым снижая уровень комфорта жизни людей. Города территориально расположены в разных климатических поясах, а используемые подходы по структурному развитию городской застройки во всех городах России имеют общий характер [1]. Следовательно, возникает потребность в исследовании условий формирования пешеходного биоклиматического комфорта в разных морфотипах городской застройки при различных метеоусловиях, которые характерны для определенных климатических зон.

Было впервые исследовано влияние метеоусловий на образование уровня биоклиматического комфорта, формируемого в застройке в городах Красноярского края, расположенных в разных климатических поясах, а именно: Норильск (арктический), Северо-Енисейск (субарктический) и Минусинск (умеренный).

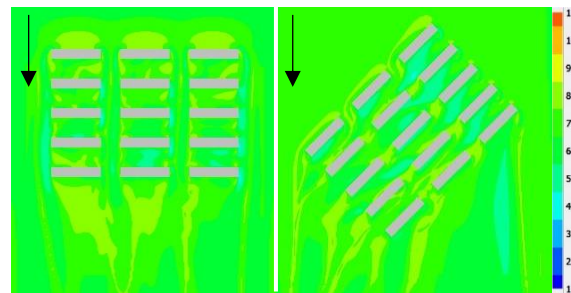
Исследования выполнялись с помощью специализированных программных продуктов: «SigmaEco» и «SigmaPedestrianComfort» [1-2]. Программный модуль SigmaEco позволяет рассчитывать многокомпонентные, турбулентные течения с дисперсной фазой, учитывая теплообмен и солнечную радиацию в условиях городской среды. Программный модуль SigmaPedestrianComfort - позволяет выполнять зонирование территории по уровням биоклиматического комфорта на основе расчета распределения температурных и сезонных критериев комфортности.

Для изучения был выбран строчный морфотип жилой застройки, состоящий из зданий прямоугольной формы, где размеры зданий $15 \times 75 \times 15$ м (высота, длина, ширина соответственно). Исследования выполнялись для каждого климатического пояса в зимний и летний период времени.

Для примера приведены результаты расчета для умеренно климатического пояса. Рассматривался летний дневной период, где температура воздуха задавалась равной 25°C , скорость ветра, согласно логарифмическому закону – на высоте 10 м $v=2.5$ м/с. Для оценки биоклиматического комфорта была использована радиационно-эквивалентно-эффективная температура (РЭЭТ) – это комплексный показатель, объединяющий влияние температуры, влажности воздуха, скорости ветра и интенсивности теплового излучения (радиации) на теплоощущение человека. Для примера приведены результаты зонирования рассматриваемого морфотипа по уровням комфортности в летний период времени (рис. 1).

Анализируя полученные при численном исследовании результаты зонирования, можно определить,

что формируются условия преимущественно прохладные и местами комфортные ($\text{РЭЭТ}=7, 8$).



Примечание → направление ветра.

Рис. 1. Схема стенда

Стоит отметить, что строчный морфотип состоит из низкоэтажных зданий и отсутствует уплотненное строительство, что способствует формированию наиболее комфортных для жизнедеятельности человека условий в связи с хорошей продуваемостью территории. Данный вид морфотипа является комфортным для субарктического и умеренного климатического пояса. В арктическом климатическом поясе данный вид застройки способствует нежелательному накоплению снежных отложений и возникновению интенсивных ветровых зон, что приводит к затруднению организации мест отдыха и общего досуга.

Проведение подобных исследований в ходе проектирования новых жилых микрорайонов позволит определить, какие условия будут формироваться в уличных пространствах и как они будут влиять на здоровье человека. Применение данных численных подходов позволит аргументированно и корректно принимать стратегические решения, связанные с развитием жилого пространства в городе, так и для понимания какие мероприятия необходимо реализовать для устранения негативного воздействия на окружающую среду и повысить качество жизни людей на урбанизированных территориях.

Список литературы:

1. СП 42.13330.2016 Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 35-01-2001.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ от 04 июня 2021, «Программный модуль для расчета распространения автомобильных выбросов в городских кварталах (SigmaEco)», № 2021618370
3. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ от 28 января 2025 «Программный модуль для расчета биоклиматического уровня комфорта пешеходов в уличных пространствах городской среды (SigmaPedestrianComfort).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-21-20073, <https://rscf.ru/project/26-21-20073/>, за счет целевого финансирования (гранта) Красноярского краевого фонда науки.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО РЕЖИМА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ГОРЯЧИХ ТЕЛ В ЖИДКОСТЯХ

Молотова И.А.^{1,2}, Виноградов М.М.¹, Забиров А.Р.^{1,3}, Губанова Т.А.¹, Дебердеев Д.Д.¹, Молотов И.М.³, Ягов В.В.¹

¹НИУ «Московский Энергетический Институт», Москва
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

²ФБУ Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, Москва
107140, Россия, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, к. 5

³Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

Высокоинтенсивный режим теплообмена при охлаждении высокотемпературных тел в недогретых жидкостях был обнаружен в исследованиях английских ученых G.F. Hewitt и D.B.R. Kenning еще в 1986 году [1]. Этот режим характеризуется высокими значениями отводимых тепловых потоков порядка нескольких МВт/м², что не свойственно условиям устойчивого пленочного кипения, обладающего низкой интенсивностью. Данный режим вызывает интерес, поскольку он наблюдается при охлаждении в жидкостях тел, нагретых до температур выше критической ее температуры. В этих условиях между телом и жидкостью моментально образуется устойчивая паровая пленка ввиду термодинамической невозможности прямого контакта жидкость/нагретое тело. В исследованиях нашей научной группы было подтверждено существование особого режима теплообмена в недогретой воде, а также в спиртах в условиях значительных недогревов и при охлаждении микроструктурированных поверхностей. Актуальность исследований обусловлена тем, что такие режимы наблюдаются при возникновении аварийных ситуаций на АЭС, когда необходимо как можно эффективнее охладить разогретые до высоких температур тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы). Также такие режимы характерны для технологий закалки.

На протяжении более чем 15 лет на кафедре Инженерной теплофизики НИУ «МЭИ» ведутся систематические исследования по накоплению массива экспериментальных данных по охлаждению высокотемпературных сфер и цилиндров в различных жидкостях, таких как вода, спирты (этиловый и изопропиловый) и их смеси с водой различных концентраций, FC-72, азот, аргон. Диапазоны экспериментальных режимов: недогрев жидкости от 0 до 180 К, давления от 0,02 до 1 МПа. Рабочие образцы выполнены из различных металлов с гладкой и модифицированной поверхностью (нанесение покрытий, микроструктурирование, плазменная обработка). Также ведется подготовка к экспериментальным исследованиям по охлаждению высокотемпературных металлических тел в объеме жидкого металла (натрий). Интерес к таким исследованиям вызван работой М.М.Х. Farahat [2], в которой был зафиксирован особый режим теплообмена при охлаждении танталовых сфер в жидком натрии.

Полученный массив данных используется для проверки разработанной физической модели возникновения высокоинтенсивного режима теплообмена. Согласно этой модели, выступы шероховатости охлаждаемой поверхности вызывают локальные контакты

жидкость/твердое тело. Температура этих выступов в момент наступления прямого контакта (повторного смачивания) ниже критической температуры охлаждающей жидкости, тогда как средняя температура поверхности может быть существенно выше, что наблюдается в экспериментах. В результате была получена формула для расчета температуры перехода к интенсивному режиму (T_{tr}) с учетом шероховатости поверхности имеет вид [3]:

$$T_{tr} - T_{lim} = C_8 \frac{h_{lg}(\rho_{liq}^3 \sigma g)^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{(\rho c \lambda)_w}} \sqrt{\frac{\beta \Delta T_{sub} z}{v_{liq} Pr_{liq}}} Ra$$

T_{lim} – температура предельного перегрева жидкости, °С; h_{lg} – удельная теплота парообразования, Дж/кг; ρ_{liq} – плотность жидкости, кг/м³; σ – поверхностное натяжение, Н/м; g – ускорение свободного падения, м/с²; β – коэффициент термического расширения жидкости, К⁻¹; $\Delta T_{sub} = (T_s - T_{liq})$ – недогрев жидкости (T_s – температура насыщения жидкости, T_{liq} – температура жидкости), К; z – характерный масштаб тела, м; v – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с; Pr – число Прандтля для жидкости; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, м; $\epsilon = (\rho c \lambda)^{0.5}$ – тепловая активность материала, Дж/м²·°С·с^{1/2} (ρ – плотность материала, кг/м³, c – теплоемкость, Дж/(кг·К), λ – теплопроводность Вт/м·°С). $C_8=0,085$ – численная константа.

В настоящее время модель проверена на массиве экспериментальных данных, состоящем более чем из 3000 экспериментальных режимов, в том числе для материалов толерантного типа применительно к оболочкам ТВЭЛов, образцов с покрытиями и микроструктурированием поверхности, а также для образцов при наличии внутреннего тепловыделения. Средние относительные отклонения модели составляют около 30%, что подтверждает ее работоспособность для проведения подобных расчетов.

Список литературы:

1. S. Aziz, G.F. Hewitt, D.B.R. Kenning. Heat Transfer Regimes in Forced-Convection Film Boiling on Spheres // Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf. 1986. V. 5. P. 2149–2154.
2. Farahat M. M. K. Transient boiling heat transfer from spheres to sodium. – Northwestern University. – 1971.
3. Канин П. К., Ягов В. В., Забиров А. Р., Молотова И. А., Виноградов М. М., Рязанцев В. А. О механизме дестабилизации паровой пленки при нестационарном пленочном кипении // Теплофизика высоких температур. – 2023. – Т. 61. – №. 2. – С. 241–250.

Работа поддержана РФФ
(грант № 25-79-10144).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ СУШКЕ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ И ОДНОРОДНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Сыродой С.В., Нигай Н.А., Солодовникова Ж.А., Плинокосов К.М., Кузнецов Г.В.

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

Анализ современных тенденций в развитии мировой энергетики, показывает устойчивый отказ от традиционных (угольных) тепловых станций [1] в пользу так называемых нетрадиционных возобновляемых источников энергии [2]. В связи с этим возрастает интерес к использованию древесины в качестве топлива ТЭС. Последние более стабильны и эффективны по сравнению с ветро- и солнечными источниками энергии, а также образуют меньше вредных выбросов [3]. В качестве примера можно привести станцию Avedore в Дании, которая работает на биомассе. Но надо отметить, что одна из основных проблем внедрения древесины в энергетический комплекс экономики – высокая влажность древесины. Последнее приводит к значимому снижению теплоты сгорания, увеличивает время воспламенения.

В связи с этим многие исследователи прилагают достаточно большие усилия к разработке новых технологий сушки древесины. В тоже время в мировой научной периодике не приводилось результатов с описанием механизмов тепло- и массопереноса при сушке относительно массивных монолитных фрагментов древесины, соответственно не приведены результаты показывающие отличия или идентичность этих процессов при сушке высокопористого диспергированного слоя биомассы. Решение такой задачи позволит разработать методику обоснования выбора той или иной прогностической модели процессов тепло- и массопереноса необходимой для проведения опытно-конструкторских работ в рамках проектирования сушильных установок.

В качестве объекта исследований применялись типичные отходы деревообработки (древесная стружка). Последняя засыпалась в кубическую емкость с характерным размером 100 мм. В качестве монолитного фрагмента использовалась доска с характерными размерами 250x150x70 мм. Навески исследовавшейся в экспериментах влажной древесной биомассы с разной конфигурацией диспергированная в кубической емкости (см. рис. 1 а) и монолитная (см. рис. 1 б).

С целью измерения температур в слое материала использовался комплекс медь-константановых термопар (толщина проволоки 0,1 мм, диаметр спая 0,25 мм). Последние устанавливались в слое древесной биомассы таким образом, чтобы имелась возможность в реальном времени оценивать температурное поле во всей системе «слой древесины – стенки емкости – внешняя среда». Для этого термопары крепились на равноудалённом расстоянии (одна от другой). В условиях, когда тепловой поток к подводит равномерно со всех сторон (другими условиями выполняются условия симметрии) можно обосновано пред-

положить, что экспериментальные данные об этой части можно симметрично отобразить на остальную часть образца.

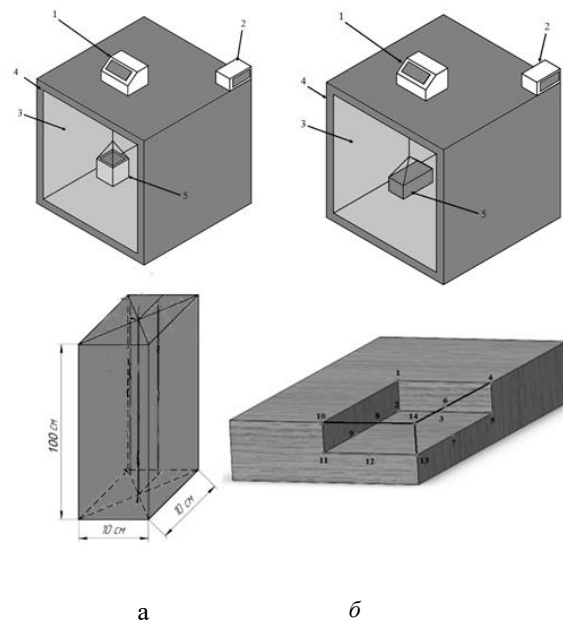


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – лабораторные весы Massa-K; 2 – терморегулятор TPM 500; 3 – электрический нагреватель; 4 – сушильная камера SU 32; 5 – образец биомасса, а – в диспергированном виде, б – монолитное состояние.

Проведенные эксперименты показали существенные отличия процессов сушки древесины, выпаренной в виде диспергированного и монолитного слоев. Показано, что при обезвоживании измельченной биомассы в последней формируется сложный немонотонный спектр температур с локальными экстремумами. Такие нелинейные тренды температур обусловлены разнонаправленным движением водяных паров, формирующихся в результате испарения воды, и конденсацией пара в глубинных слоях древесины.

Список литературы:

1. The coal phase-out in Germany and Central Western Europe under new framework conditions. Egerer J., Grimm V., Lang L.M., Pfefferer U. *Energy Economics*, 2025, Vol. 151, 108886.
2. Legitimizing sustainability transitions through stakeholder participation: Evaluating the Coal Commission in Germany. Radtke J., Löw Beer D. *Energy Research & Social Science*, 2024, Vol. 116, 103667.
3. Green mobility infrastructure: A techno-economic analysis of hybrid wind-solar PV charging stations for electric vehicles in Germany. Dejkam R., Madlener R. *Energy*, 2025, Vol. 334, 137450.

Работа поддержана РФФ
(грант № 25-79-10045).

ДВУХКОНТУРНАЯ СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ НА ФАЗОПЕРЕХОДНЫХ МАТЕРИАЛАХ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЗАРЯДКОЙ И РАЗРЯДКОЙ

Соколова Е.А., Аболгасем М., Садеги Х., Газан С.Х.

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

Аннотация

В работе представлена новая конфигурация аккумулятора тепла с фазовым переходом (PCM), имеющего два независимых теплоносителя: один для зарядки, другой для разрядки. Такая схема позволяет одновременно заряжать и разряжать аккумулятор без прерывания теплового потока. Конструкция выполнена в виде блочного теплообменника с вертикальными цилиндрическими каналами. Центральная труба содержит первичный теплоноситель (пар, отбираемый из цикла атомной электростанции), кольцевая полость заполнена PCM – эритритом (температура плавления 120°C) [8], а внешний зазор содержит вторичный теплоноситель, подающий тепло в систему централизованного теплоснабжения (ЦТС) [1]. Использована одномерная нестационарная тепловая модель с движущейся границей фазового перехода, решаемая численно методом конечных разностей [7]. Коэффициент конвективной теплоотдачи для теплоносителя определялся через число Нуссельта, которое для турбулентного течения рассчитывается по уравнению Диттуса – Бельтера [6].

Система интегрирована с реактором на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем ALFRED (300 МВт тепловых) [5] и оценена для годовой потребности теплоснабжения 2180 ТДж [1]. Рассмотрены три сценария отбора пара: из ступеней низкого давления, из ступеней высокого давления и комбинированный; последний признан оптимальным. Оптимальная ёмкость одного модуля составляет 18 МВт·ч (радиус бака 3,7 м, 1945 трубок) [4]. Для летних условий (средняя тепловая нагрузка 19,1 МВт) потери электрической мощности равны 11,1%, а приведённая стоимость тепла (LCOE) – 16,5 \$/МВт·ч. Среднегодовая LCON равна 17,9 \$/МВт·ч [1].

Основные результаты

Двухконтурная схема позволяет АЭС работать в базовом режиме и одновременно покрывать переменный суточный и сезонный графики ЦТС. Типовой суточный график тепловой нагрузки сильно различается по сезонам: зимой нагрузка достигает 130 МВт в среднем, весной/осенью – около 60 МВт, летом – примерно 19 МВт [3]. Термодинамический анализ показал: в зимний период полный КПД когенерационной системы достигает 74,8%, чистая электрическая мощность на выходе – 94,5 МВт, эквивалентные потери мощности – 31,8 МВт. В летний период КПД системы равен 47,8%, потери мощности – 11,1% [1]. Доля энергии, покрываемой вспомогательными нагревателями, не превышает 2% даже в пиковые периоды.

Экономический анализ включал расчёт приведённой стоимости электроэнергии (LCOE) и тепла (LCON). Для реактора ALFRED использован метод масштабирования капитальных затрат [2]. Стоимость накопления одного кВт·ч тепла в аккумуляторе определялась с учётом годовых капитальных затрат на хранение и годового объёма запасённой энергии [4]. Наименьшее значение LCON достигается летом – 16,5 \$/МВт·ч. Среднегодовая LCON равна 17,9 \$/МВт·ч, что является конкурентоспособным показателем. Зимний LCON составляет 21,2 \$/МВт·ч. Система сокращает выбросы CO₂ на 119 250 тонн в год по сравнению с газовой когенерацией [1].

Заключение

Разработанная двухконтурная система хранения тепла на фазопереходных материалах, интегрированная с реактором IV поколения ALFRED [5], позволяет эффективно сочетать базовую работу АЭС с переменным графиком теплоснабжения. Система технически реализуема, экономически конкурентоспособна (среднегодовая LCON около 18 \$/МВт·ч) и даёт значительный экологический выигрыш [1].

Список литературы:

1. Ghazaei S.H., Sadeghi K., Chebac R., Sokolova E., Fedorovich E., Cammi A., Ricotti M.E., Shirani A.S. On the use of advanced nuclear cogeneration plant integrated into latent heat storage for district heating // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2022. – Vol. 52. – P. 101838.
2. Boarin S., Ricotti M.E. An evaluation of SMR economic attractiveness // *Science and Technology of Nuclear Installations*. – 2014. – Vol. 2014. – P. 803698.
3. Gadd H., Werner S. Daily heat load variations in Swedish district heating systems // *Applied Energy*. – 2013. – Vol. 106. – P. 47–55.
4. Liu M., Jacob R., Belusko M., Riahi S., Bruno F. Techno-economic analysis on the design of sensible and latent heat thermal energy storage systems for concentrated solar power plants // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 178. – P. 443–455.
5. Ponciroli R., Bigoni A., Cammi A., Lorenzi S., Luzzi L. Object-oriented modelling and simulation for the ALFRED dynamics // *Progress in Nuclear Energy*. – 2014. – Vol. 71. – P. 15–29.
6. Sarbu I., Sebarchievici C. A comprehensive review of thermal energy storage // *Sustainability*. – 2018. – Vol. 10(1). – P. 191.
7. Smith R., Inomata H., Peters C. Chapter 8 – Heat Transfer and Finite-Difference Methods // *Supercritical Fluid Science and Technology*. – Elsevier, 2013. – Vol. 4. – P. 557–615.
8. Yang B., Wang N., Song Y., Liu J. Study on the improvement of supercooling and thermal properties of erythritol-based phase change energy storage materials // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 175. – P. 80–97.

*Исследование выполнено при поддержке гранта
Российского научного фонда
(проект No 25-79-10229).*

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВИДА ДРЕВЕСИНЫ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ЗОЛОВОГО ЗАНОСА ТИПИЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА

Солодовникова Ж.А., Сыродой С.В., Сенчихин Д.К., Баранова А.А., Замалтдинов Р.Р.

ФГАОУ ВО НИ Томский политехнический университет
пр. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия

Одним из перспективных способов снижения негативного воздействия является применение композиционных топлив, в частности смесь угля и биомассы [1]. Немногочисленные примеры успешного снижения выхода антропогенных оксидов (серы, азота) при замене 10-15% угля древесной биомассой при использовании такого, композитного топлива иллюстрируют перспективность развития такой технологии топливосжигания на ТЭС. Следует отметить, что сжигание древесины характеризуется термическим разложением ее компонентов, с возможным образованием смол, пиролизных масел и др. Образование подобных компонентов, при столкновении не сгоревших частиц с нагревающими поверхностями, образует на поверхностях зоны шлакования [2]. При больших временах работы толщина такого теплоизоляционного слоя может быть большой. В этом случае существенно снижается эффективность процесса топливосжигания.

Цель работы – обоснование по результатам исследования влияния вида частиц древесной биомассы и параметров поверхностей, соответствующих поверхностям нагрева котельного оборудования, на процессы соударения и налипания пиролизного остатка частиц древесины.

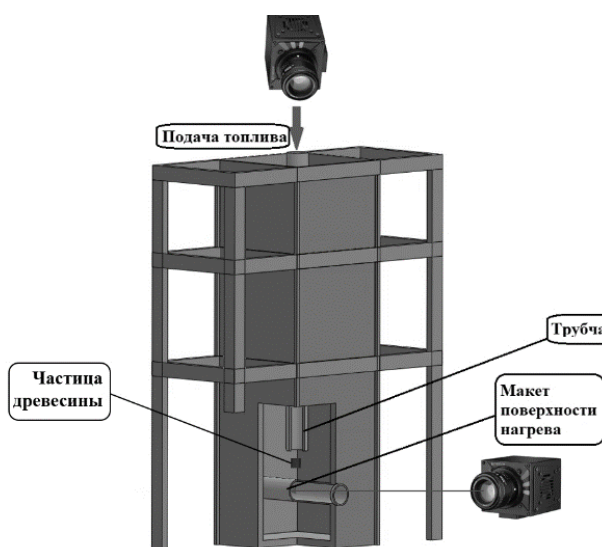


Рис. 1. Экспериментальный стенд

Экспериментальные исследования проводились на стенде, схема которого приведена на рисунке 1. Основной частью экспериментального стенда является каркас, с закрепленной в нем трубчатой печью, расположенной вертикально. Специальным координатным устройством частица фиксируется в топочном пространстве, сбрасываясь по сигналу от включения ка-

меры. В нижней части стенда закреплена изолированная камера, с зафиксированной цилиндрической моделью поверхности нагрева.

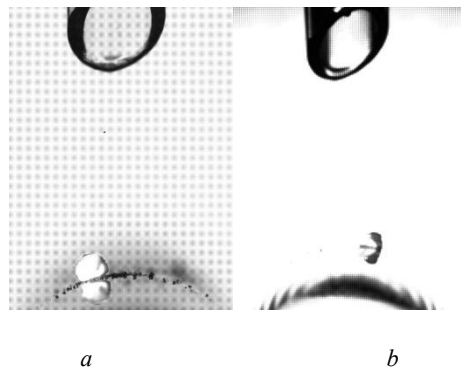


Рис. 2. Видеокадры процесса соударения частицы и модельной поверхности при временах процесса термического разложения: а – $t_{pir} = 30$ с, б – $t_{pir} = 60$ с.

Процесс удара частицы о поверхность модели фиксируется высокоскоростной камерой. Начальные параметры частицы фиксируются высокоточными весами, с точность до 0,1 мг.

По результатам исследования получены данные о накопительном эффекте отложений шлака и смол на модельной поверхности на процесс налипания частиц.

Список литературы:

1. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Kostoreva Zh.A., Nigay N.A., Purin M.V., Karelin V.A., Salomatov V.V. Analysis of the influence of the type of heat transfer on the dynamics of the ignition processes of wood biomass particles under complex heating conditions // Combustion and Flame. 2024. V. 262, N 113353. P. 113353. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2024.113353>
2. Douhy T., Havlik J. Effect of combustion air humidification on the operation of a biomass boiler – Theoretical analysis // Heliyon. 2025. V. 11, N 3. P. e42299. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e42299.

Исследование выполнено за счет грантов РФФ
(проект № 25-79-10045)

Авторский указатель

- Аболгасем М., 155
Авдеев И.В., 84
Акулов А.Е., 10
Александров В.Ю., 94
Алексеева Е.В., 145
Алексеев С.В., 149, 151
Алифанов О.М., 108
Аминев Д.А., 54
Андрющенко В.А., 73, 136
Антонов Д.В., 45, 147
Архипов В.А., 74
Асылкаев А.М., 65
Ашихмин А.Е., 60, 117, 124
Бакакин Г.В., 82
Баранова А.А., 139, 140, 156
Басалаев С.А., 74
Батыршин Э.С., 126
Белослудов В.Р., 75
Белявская П.В., 141
Беспятов М.А., 103, 105, 109
Биккинина Н.Б., 118
Благушин И.А., 143
Богомякова О.Б., 10
Божеева Д.М., 46
Божко Ю.Ю., 75
Борисов Б.В., 31
Боярских К.А., 104, 110
Брацун Д.А., 67
Бугай Ю.В., 10
Будник С.А., 108
Булатова А.З., 119
Булатова Е.В., 117, 124
Бусов К.А., 47
Бухтояров А.С., 41
Бычков А.Л., 134
Ваганов Р.А., 51
Валиуллина В.И., 48, 53
Валова Г.С., 10
Васильев А.Ю., 142
Васильков С.А., 129, 145
Веретенников С.В., 17, 36, 143
Виноградов М.М., 153
Витошкин И.Е., 56
Вишняков Е.А., 32, 33, 144
Вожаков И.С., 21, 95
Войткова К.А., 63, 64
Волков С.М., 55, 81, 91, 92
Воробьев М.А., 49
Габдулхакова Д.И., 30
Гаврильев А.Ч., 112
Газзи С.Х., 155
Галеев Р.Р., 48
Гельфонд Н.В., 103, 105, 109
Герасимов А.С., 23
Герасимов В.Е., 130, 132
Гец К.В., 75
Главный В.Г., 81
Горбатов А.В., 10
Горбунова Я.А., 15
Гордиенко М.Р., 80, 81, 82
Горячев В.Д., 76
Губанова Т.А., 153
Гузей Д.В., 51
Гуляев Н.А., 55, 92
Гурьянов А. И., 146
Давыдов М.Н., 11, 50
Давыдова А.В., 10
Данейко О.И., 74
Двойнишников С.В., 80, 81, 82
Дебердеев Д.Д., 153
Дектерев А.А., 46, 77, 78, 149, 152
Дектерев Ар.А., 78
Дектерев Д.А., 150
Денисенко В.В., 79
Дмитрачкова А.П., 30
Дулин В.М., 34, 35
Евдокименко И.А., 68, 81, 91, 92
Евдокимов О.А., 17, 36, 146
Елагин И.А., 145
Епишин А.И., 6
Жданов Р.К., 75
Жигарев В.А., 51
Журавлев Д.В., 145
Забилов А.Р., 153
Замалтдинов Р.Р., 62, 156
Зарипов Д.И., 30
Здорников С.А., 9
Зеленцов Д.О., 124
Зинкевич В.П., 123
Зиннатуллин Р.Р., 48
Зорькина А.И., 52, 120
Зубанов К.С., 55, 80, 81, 82
Зуев В.О., 80
Иванов Р.И., 36, 146
Исаенков С.В., 9
Кабардин И.К., 55, 80, 81, 82
Какаулин С.В., 80, 82
Карпов Д.И., 131, 135
Кархов А.О., 49
Качурин С.К., 55
Кашкаров А.О., 65
Квасников Л.Г., 73, 83, 121
Клементьев А.А., 22, 84
Клепцова Л.А., 85
Клименко Л.С., 57
Ковалев Д.Н., 147
Ковалева Л.А., 26, 53
Коваленко П.В., 73, 83, 121
Ковешников К.С., 22
Колганов П.А., 36
Колесниченко И.В., 16
Копьев Е.П., 96
Коробейников С.М., 130, 131, 132, 134
Коробейщиков Н.Г., 122
Кортаев Р.А., 86
Котляр А.А., 17
Кравченко И.В., 149
Кравченко М.Н., 54
Краев И.М., 80
Куватов А.Т., 25
Кудияров В.Н., 100, 148
Кузин Т.М., 103, 105
Кузнецов В.А., 46, 149
Кузнецов В.В., 5
Кузнецов Г.В., 62, 139, 140, 154
Куйбин П.А., 18
Кукшинов Н.В., 107
Куперштох А.Л., 133
Курдюмов Н.Е., 148
Ламбин А.В., 87
Ларин И.А., 32, 33
Лебеда К.С., 23, 24
Левин О.В., 145
Легостаев Д.Е., 92
Леманов В.В., 38
Лисовенко Д.С., 6
Листратов Я.И., 97
Литвинцев К.Ю., 150
Личиков И.В., 20
Лобанов П.Д., 55, 68, 81, 82, 91, 92
Лобасов А.С., 90, 150
Локтионов В.Д., 15, 19
Ломан В.А., 134
Лукашов В.В., 38
Лукьянов А.А., 21
Лукьянов Ал.А., 20
Лутченко И.И., 151
Маевский К.К., 106
Макаров М.В., 22
Макаров М.С., 23, 24
Максимов В.И., 31
Маликов А.Г., 56
Мальцев Л.И., 149
Мамышев Д.Л., 94
Марышев Б.С., 57
Матвиенко О.В., 74
Медведев Д.А., 133
Меледин В.Г., 80, 81, 82
Мелешкин А.В., 95
Мельников С.А., 112
Мешкова В.Д., 152
Мещеряков А.А., 88
Минаков А.В., 46, 51, 90, 152
Минин С.В., 58
Митрополит И.Ю., 16
Михальцов Д.А., 25
Михеев Н.И., 7
Молотов И.М., 153
Молотова И.А., 153
Молчанов Т.И., 107
Моржухина А.В., 108
Морозов А.В., 84
Мостович Е.А., 105, 109
Мулладжанов Р.И., 151
Мусин А.А., 53
Мухарьмова Г.И., 26
Назарова А.А., 105, 109
Наумкин В.С., 23, 24
Наумов И.В., 27, 37

- Неверов А.Л., 51
 Некрасов С.С., 139, 140
 Ненарокомов А.В., 108, 123
 Нигай Н.А., 63, 64, 154
 Николаев И.В., 122
 Обручкова Л.Р., 110
 Озерных В.С., 16
 Орлов А.Д., 73, 83, 121
 Орлова Е.Е., 58
 Остапенко В.В., 10
 Очеретяный С.А., 59
 Павлов Д.А., 94
 Палкин Е.В., 151
 Палымский И.Б., 28, 29
 Панков А., 55
 Пантелеев С.А., 30
 Перфильева К.Г., 74
 Петренко И.А., 10
 Петрова Ю.Ю., 124
 Петровский Д.В., 10
 Пискунов М.В., 60, 117, 124
 Пискунова А.Е., 60, 117, 124
 Платонов Д.В., 90
 Плинокосов К.М., 62, 139, 140, 154
 Плюснин А.М., 63, 64
 Полуянов А.О., 16
 Прибатурин Н.А., 81, 82, 91, 92
 Прокофьев В.В., 59
 Прохоров А.Н., 94
 Прууэл Э.Р., 65
 Пряхников М.И., 51
 Рахманов В.В., 80, 81, 82
 Ридель А.В., 131, 134
 Ромашенко А.В., 10
 Роньшин Ф.В., 52, 120
 Ротарь А.Д., 81
 Ртищева А.С., 93
 Рубцов И.А., 65
 Рыбакин Б.П., 76, 125
 Саввинова Н.А., 111
 Савенко Р.А., 131, 135
 Садеги Х., 155
 Сажин С.С., 8
 Сазонова М.Л., 86
 Сайфуллин Д.Д., 145
 Салихов Ф.Ю., 31
 Салосина М.О., 108
 Сапогов А.В., 32, 33, 144
 Сапожников И.С., 32, 33, 84, 97
 Саядян А. К., 100
 Светонос А.И., 91, 92
 Семенёв П.А., 84
 Сентябов А.В., 90, 150
 Сенченко В.Н., 112
 Сенчихин Д.К., 156
 Сергеев Д.А., 80
 Серебряков Д.И., 94
 Средкин Н.Н., 110, 113
 Сиваков Н.С., 61, 66
 Сиденков Д.В., 25, 41
 Сираев Р.Р., 67
 Скрипкин С.Г., 27
 Сладкая Д.А., 34, 95
 Слепцов С.Д., 111
 Смовж Д.В., 73, 136
 Соколова Е.А., 155
 Солнышкина О.А., 118, 119, 126
 Солодовникова Ж.А., 139, 154, 156
 Сорокин М.И., 35
 Сухачев М.М., 21
 Сыродой С.В., 62, 63, 64, 140, 154, 156
 Тамашевич М., 63, 64
 Тарасов А.В., 36
 Тарулин М.А., 96
 Тен К.А., 65
 Теребилкина А.Е., 38
 Терехов В.В., 39
 Терехов В.И., 39
 Тинтулова М.В., 27, 37
 Титов Д.М., 108
 Токарев М.П., 35
 Топейцев Г.В., 59
 Трифонов В.А., 103, 105, 109
 Троицкая Ю.И., 80
 Трубицына Л.П., 9
 Тулупов А.А., 10
 Туманник А.С., 65
 Тутукин А.В., 97, 144
 Усанов В.А., 66
 Уточкин В.Ю., 67
 Фахми А., 60
 Федоренко В.А., 38
 Филимонов С.А., 78
 Филиппов М.В., 39
 Филиппский К.А., 68, 91, 92
 Финников К.А., 150
 Фортова С.В., 79
 Халеменчук В.П., 65
 Хе А.К., 10
 Хищенко К.В., 104, 110, 112, 113, 114
 Цыпкин Г.Г., 69
 Черданцев А.В., 9
 Черевко А.А., 10
 Чернов А.А., 11, 50
 Черняйкин И.С., 105
 Чирков В.А., 145
 Шабиев Ф.К., 88
 Шалаев В.И., 40
 Шарифуллин Б.Р., 27
 Шарифуллина Т.С., 10
 Шаров К.А., 38
 Шарыпов О.В., 96
 Шевелев Д.П., 105, 109
 Шестаков М.В., 20
 Ширяев Д.В., 97
 Шлыкова А.О., 98
 Шмаков А.Н., 56
 Шульженко П.Д., 152
 Шумка Д.П., 41
 Щеляев А.Е., 86
 Щербачев А.И., 42
 Щинников П.А., 99, 141
 Эльман Р.Р., 100, 148
 Юлмухаметова Р.Р., 53
 Ягов В.В., 153
 Ягодницына А.А., 20
 Якуш С.Е., 61
 Chu S., 89
 Feng P., 89
 Khandeeva N. A., 89
 Kolotilov V.A., 89
 Kurganov A., 89
 Ostapenko V.V., 89

Содержание

Пленарные лекции

Кузнецов В.В.

Проблемы тепломассообмена при фазовых переходах в каналах малого размера 5

Лисовенко Д.С., Епишин А.И.

Механические свойства жаропрочных никелевых сплавов 6

Михеев Н.И.

Теплообмен и трение в каналах с самоорганизующимися вторичными течениями 7

Сажин С.С.

Новые подходы к моделированию нагрева и испарения жидких пленок 8

Здорников С.А., Исаенков С.В., Трубицына Л.П., Черданцев А.В.

Газожидкостное течение в горизонтальной трубе: от расслоенного к кольцевому режиму 9

Акулов А.Е., Богомякова О.Б., Бугай Ю.В., Валова Г.С., Горбатов А.В., Давыдова А.В., Остапенко В.В., Петренко И.А., Петровский Д.В., Ромащенко А.В., Тулупов А.А., Шарифуллина Т.С., Хе А.К., Черевко А.А.

Гидродинамика патологий головного мозга 10

Чернов А.А., Давыдов М.Н.

Аналитическое описание кинетики суммарного фазового превращения
в магматическом расплаве при его быстрой декомпрессии 11

Секция 1. Теплообмен и гидродинамика в однофазных средах

Горбунова Я.А., Локтионов В.Д.

Влияние несимметричных условий охлаждения боковой поверхности слоя расплава кориума,
подогреваемого по нижней поверхности, на характер течения в слое
и теплообмен на его границах при тяжелой аварии в ЯЭУ 15

Колесниченко И.В., Митрополит И.Ю., Полуянов А.О., Озерных В.С.

Роль полоидальных течений, созданных локализованными сжимающими
и вращающими электромагнитными силами, в теплообмене транзитного потока
жидкого металла в цилиндрическом канале 16

Котляр А.А., Веретенников С.В., Евдокимов О.А.

Экспериментальное исследование эффективности заградительного охлаждения
при изменении относительного шага между отверстиями различной геометрической формы 17

Куйбин П.А.

Характеристики волновых возмущений на коническом винтовом вихре 18

Локтионов В.Д.

Корреляции для чисел Нуссельта на границах слоя жидкости, подогреваемого снизу,
учитывающие значения чисел Прандтля и температурные условия на границах слоя 19

Лукьянов Ал.А., Личиков И.В., Ягодницына А.А., Шестаков М.В.

Экспериментальное исследование структуры поперечного течения
в модели тепловыделяющей сборки методом цифровой трассерной визуализации 20

Лукьянов А.А., Сухачев М.М., Вожаков И.С.

Численное исследование падения давления в сборке с винтовым крестообразным профилем 21

Макаров М.В., Клементьев А.А., Ковешников К.С.

Исследование методом LES смешанной конвекции жидкого металла
в вертикальных каналах в поперечном магнитном поле 22

Макаров М.С., Лебеда К.С., Наумкин В.С., Герасимов А.С.

Численное моделирование термогазодинамики потока гелий-ксеноновой газовой смеси
с малым числом Прандтля в семизлементной сборке при неоднородном тепловыделении 23

Макаров М.С., Лебеда К.С., Наумкин В.С. Численное моделирование теплоотдачи при течении гелий-ксеноновой смеси в неограниченной сборке тепловыделяющих элементов с дистанционирующими решетками	24
Михальцов Д.А., Куватов А.Т., Сиденков Д.В. Сравнительный анализ двух математических моделей плёночной конденсации на каплевидной трубе	25
Мухарямова Г.И., Ковалева Л.А. Моделирование трубопроводного транспорта высоковязких нефтей после электромагнитной обработки	26
Наумов И.В., Шарифуллин Б.Р., Скрипкин С.Г., Тинтулова М.В. "Левитирующий" вихревой реактор	27
Палымский И.Б. Об устойчивости слоя сжимаемого газа в поле тяжести	28
Палымский И.Б. Об устойчивости слоя околокритического газа	28
Пантелеев С.А., Габдулхакова Д.И., Дмитрачкова А.П., Зарипов Д.И. Влияние кинематических характеристик пульсирующего потока на ламинаризацию турбулентного течения в круглом канале	30
Борисов Б.В., Максимов В.И., Салихов Ф.Ю. Численный анализ влияния высоты нагревательного элемента на тепловой режим резервуара с мазутом	31
Вишняков Е.А., Ларин И.А., Сапогов А.В., Сапожников И.С. Расчетный анализ совместной работы воздушных систем РУ БРЕСТ-ОД-300	32
Сапожников И.С., Вишняков Е.А., Сапогов А.В., Ларин И.А. Численное моделирование теплогидравлики блока реакторного БР-1200 с использованием 1D-3D подхода	33
Сластная Д.А., Дулин В.М. Численное исследование образования NO_x в бунзеновских пламенах аммиачно-водородной смеси	34
Сорокин М.И., Токарев М.П., Дулин В.М. Экспериментальное исследование энергообмена между различными масштабами турбулентного движения в струях круглого и прямоугольного сечения	35
Тарасов А.В., Колганов П.А., Евдокимов О.А., Веретенников С.В., Иванов Р.И. Исследование срывных характеристик горения газообразного топлива в противоточной вихревой трубе	36
Тинтулова М.В., Наумов И.В. Экспериментальное исследование влияния геометрии реактора на эффективность перемешивания	37
Федоренко В.А., Теребилкина А.Е., Шаров К.А., Леманов В.В., Лукашов В.В. Влияние граничных условий на теплообмен в импактной струе	38
Филиппов М.В., Терехов В.И., Терехов В.В. Исследование аэродинамики и теплообмена в каналах с сотовыми поверхностями	39
Шалаев В.И. Естественный обмен газа между пограничным слоем и каналом через проницаемую границу	40
Бухтояров А.С., Шумка Д.П., Сиденков Д.В. Оценка интенсивности теплообмена при конденсации на каплевидных трубках	41
Щербаков А.И. Динамика воздушной полости и высота кумулятивной струи при падении металлического кольца на поверхность жидкости	42
Секция 2. Гидродинамика и тепломассообмен в многофазных системах и фазовые переходы, включая нефтегазовые технологии	
Антонов Д.В. Высокотемпературная доставка аэрозолей в дыхательные пути: эксперимент и моделирование	45

Божеева Д.М., Кузнецов В.А., Минаков А.В., Дектерев А.А. Численное исследование влияния избыточного давления в камере на процесс распыла водоугольной суспензии	46
Бусов К.А. Истечение перегретой воды через два одинаковых цилиндрических канала	47
Валиуллина В.И., Галеев Р.Р., Зиннатуллин Р.Р. Установление оптимальных параметров электромагнитного воздействия для эффективного разделения трехфазных эмульсий	48
Воробьев М.А., Кархов А.О. Особенности формирования и всплытия пузырьков в покоящейся жидкости при отрыве от одиночного капилляра под воздействием неоднородного электрического поля	49
Давыдов М.Н., Чернов А.А. Квазистационарная модель роста газового пузырька в магматическом расплаве с неоднородным коэффициентом диффузии	50
Минаков А.В., Жигарев В.А., Неверов А.Л., Гузей Д.В., Пряжников М.И., Ваганов Р.А. Наномодифицированные газожидкостные системы для повышения нефтеотдачи пласта	51
Зорькина А.И., Роньшин Ф.В. Экспериментальное исследование кипения в условиях невесомости	52
Ковалева Л.А., Мусин А.А., Валиуллина В.И., Юлмухаметова Р.Р. Экспериментальные исследования и математическая модель процесса расслоения эмульсии в электромагнитных полях в динамических условиях	53
Кравченко М.Н., Аминев Д.А. Интерпретация аномальных гидродинамических эффектов при разработке месторождений высоковязких нефтей	54
Волков С.М., Лобанов П.Д., Гуляев Н.А., Качурин С.К., Панков А., Кабардин И.К., Зубанов К.С. Изучение локальных гидродинамических параметров потока в шаровой засыпке	55
Маликов А.Г., Витошкин И.Е., Шмаков А.Н. Применение синхротронного излучения для изучения фазовых превращений в алюминий-литиевых сплавах и их лазерных сварных соединениях при термическом воздействии	56
Марышев Б.С., Клименко Л.С. Конвективная устойчивость горизонтальной фильтрации в рамках обобщенной модели Козени-Кармана	57
Орлова Е.Е., Минин С.В. Определение гидравлических характеристик и капиллярных свойств пористых сетчатых материалов при моделировании двухфазного потока	58
Очеретяный С.А., Прокофьев В.В., Топейцев Г.В. Высокочастотные кавитационные автоколебания в гидросистемах, при наличии вентилируемой газовой каверны	59
Пискунова А.Е., Фахми А., Ашихмин А.Е., Пискунов М.В. Влияние межфазных явлений и диффузии компонентов масляной фазы на динамику формирования альгинатных микрокапсул в микрофлюидном чипе	60
Сиваков Н.С., Якуш С.Е. Численное моделирование истечения водяной струи в бассейн расплавленного металла	61
Плинокосов К.М., Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Замалтдинов Р.Р. Дробление капель ВУТ в поле сил Магнуса	62
Сыродой С.В., Тамашевич М., Плюснин А.М., Нигай Н.А., Войткова К.А. Испарение капель охлаждающих жидкостей на пористых высокотеплопроводных поверхностях	63
Сыродой С.В., Тамашевич М., Плюснин А.М., Нигай Н.А., Войткова К.А. Влияние формы полукруглого микроканала на характеристики охлаждения поверхностей теплоотвода	64
Халемчук В.П., Тен К.А., Кашкаров А.О., Прууэл Э.Р., Туманник А.С., Асылкаев А.М., Рубцов И.А. Потоки микрочастиц при ударном воздействии на металлические пластины с разными зазорами	65

Усанов В.А., Сиваков Н.С. Механизмы уноса и воспламенения легкоплавкого топлива в высокоскоростном горячем газовом потоке	66
Уточкин В.Ю., Брацун Д.А., Сираев Р.Р. Моделирование конвективной полимеразной цепной реакции на основе эйлера и лагранжева описаний многофазных сред	67
Евдокименко И.А., Филиппский К.А., Лобанов П.Д. Теплообмен пузырькового нисходящего течения в прямоугольном канале с одиночной преградой	68
Цыпкин Г.Г. Бифуркации и устойчивость в задачах теории фильтрации	69
 Секция 3. Экспериментальные и численные методы, методы искусственного интеллекта в теплофизике и гидрогазодинамике	
Квасников Л.Г., Коваленко П.В., Орлов А.Д., Андрющенко В.А., Смовж Д.В. Алгоритм для быстрого моделирования рабочих характеристик плазмотронов.....	73
Архипов В.А., Басалаев С.А., Данейко О.И., Матвиенко О.В., Перфильева К.Г. Моделирование характеристик турбулентного течения и теплообмена в конвективной колонке низового лесного пожара	74
Гец К.В., Жданов Р.К., Божко Ю.Ю., Белослудов В.Р. Концентрирование лития в растворе « $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{LiCl}$ » газогидратным методом: молекулярно-динамическое исследование	75
Рыбакин Б.П., Горячев В.Д. Эволюция вихревой структуры туманности после ее взаимодействия с ударной волной от взрыва сверхновой звезды	76
Дектерев А.А. О рациональном математическом моделировании процессов в энергетическом оборудовании	77
Дектерев Ар.А., Дектерев А.А., Филимонов С.А. Отработка методики моделирования горения в малоэмиссионной камере сгорания ГТУ	78
Денисенко В.В., Фортова С.В. Численное исследование эластической турбулентности при различных моделях релаксации полимерной молекулы	79
Зубанов К.С., Кабардин И.К., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Гордиенко М.Р., Рахманов В.В., Какаулин С.В., Зуев В.О., Краев И.М., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Улучшение метода ЛДА путем применения кремниевого ФЭУ и упрощенной оптической схемы для диагностики потока через многофазный барьер	80
Кабардин И.К., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Гордиенко М.Р., Зубанов К.С., Рахманов В.В., Лобанов П.Д., Главный В.Г., Прибатурин Н.А., Ротарь А.Д., Волков С.М., Евдокименко И.А. Разработка и применение метода матричной электроимпедансной диагностики для исследования тепломассообмена полидисперсной пульпы	81
Кабардин И.К., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Какаулин С.В., Рахманов В.В., Бакакин Г.В., Гордиенко М.Р., Зубанов К.С., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А. Разработка и применение ультразвукового метода диагностики гидродинамических характеристик внутри энергетических ядерных установок	82
Квасников Л.Г., Коваленко П.В., Орлов А.Д. Численное моделирование дугового плазмотрона постоянного тока	83
Клементьев А.А., Сапожников И.С., Морозов А.В., Семенёв П.А., Авдеев И.В. Разработка и валидация методики численного моделирования активной зоны реакторной установки БР-1200.....	84
Клепцова Л.А. Модульный подход к решению уравнений математической физики с динамическими граничными условиями при использовании PINN	85

Коротаев Р.А., Сазонова М.Л., Щеляев А.Е. Моделирование задымления при возгорании в багажном отсеке самолета. Сравнение программных комплексов FlowVision и FDS	86
Ламбин А.В. Физически-информированная графовая нейронная сеть на основе метода конечных объемов для решения нестационарной задачи теплопроводности	87
Мещеряков А.А., Шабиев Ф.К. Сопряжённая задача тепломассопереноса и кинетики поликонденсации при золь-гель осаждении кремнезёма в микрофилтрационных каналах фотополимерных моделей пористых сред	88
Chu S., Feng P., Khandeeva N. A., Kolotilov V.A., Kurganov A., Ostapenko V.V. Novel adaptive schemes for hyperbolic conservation laws	89
Платонов Д.В., Минаков А.В., Лобасов А.С., Сентябов А.В. Исследование структуры течения и пульсаций давления в турбинах высоконапорных ГЭС с использованием нейросетевых моделей	90
Волков С.М., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Светоносков А. И., Евдокименко И. А., Филиппский К. А. Экспериментальное исследование флуктуаций скорости течения жидкости в 7-ми стержневой гексагональной модели ТВС	91
Волков С.М., Гуляев Н.А., Евдокименко И.А., Легостаев Д.Е., Филиппский К.А., Светоносков А.И., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А. Экспериментальные исследования динамики пузырей в потоке с помощью цифровой обработки изображений	92
Ртищева А.С. Анализ проблематики и формирование базы данных для нейросетевых аппроксиматоров тепловых характеристик элементов высокоскоростных летательных аппаратов	93
Прохоров А.Н., Александров В.Ю., Серебряков Д.И., Мамышев Д.Л., Павлов Д.А. Расчётные исследования смешения и горения водорода при его подаче через форсунки инжектора со скошенным торцом	94
Сластная Д.А., Вожаков И.С., Мелешкин А.В. Численное моделирование роста гидратной оболочки вокруг пузырька диоксида углерода	95
Тарулин М.А., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Прогнозирование параметров работы атмосферного жидкотопливного горелочного устройства с паровым распылом	96
Ширяев Д.В., Листратов Я.И., Сапожников И.С., Тутукин А.В. CFD-моделирование турбулентной конвекции свинцового теплоносителя в камере смешения: сравнение моделей турбулентности	97
Шлыкова А.О. Моделирование двумерного течения в канале при обтекании профиля NASA-0012 физически-информированной нейронной сетью	98
Щинников П.А. Оптимизационные методы термодинамического анализа в энергетических технологиях	99
Эльман Р.Р., Кудияров В.Н., Саядян А. К. Моделирование системы хранения водорода на основе гидридов металлов с использованием гибридных численных, экспериментальных методов и методов машинного обучения	100

Секция 4. Теплофизические свойства веществ и новые материалы

Беспятов М.А., Трифонов В.А., Кузин Т.М., Гельфонд Н.В. Теплоёмкость и термодинамические функции тримолибдатов щелочных металлов (K, Rb, Cs) в интервале температур 5–330 К	103
Боярских К.А., Хищенко К.В. Термодинамические свойства лантана и самария в области жидкой фазы в широком диапазоне плотностей и температур	104

Беспятов М.А., Шевелев Д.П., Трифонов В.А., Мостович Е.А., Назарова А.А., Кузин Т.М., Черняйкин И.С., Гельфонд Н.В. Монокристалл тримолибдата натрия-цезия: Теплофизические и люминесцентные свойства.....	105
Маевский К.К. Моделирование термодинамических параметров ниобия и материалов с ним в качестве компонента при высокоэнергетическом воздействии	106
Молчанов Т.И., Кукшинов Н.В. Определение коэффициента поверхностного натяжения гидрофторэфиrow различных составов	107
Алифанов О.М., Будник С.А., Моржухина А.В., Ненарокомов А.В., Титов Д.М., Салосина М.О. Определение зависимости теплофизических свойств высокопористого ячеистого материала от температуры и давления	108
Беспятов М.А., Шевелев Д.П., Трифонов В.А., Мостович Е.А., Назарова А.А., Гельфонд Н.В. Низкотемпературные термодинамические и люминесцентные свойства литий-рубидиевого тримолибдата.....	109
Обручкова Л.Р., Боярских К.А., Середкин Н.Н., Хищенко К.В. Моделирование плавления и испарения свинца и висмута при ударном сжатии и изоэнтروпической разгрузке	110
Саввинова Н.А., Слепцов С.Д. Таяние слоя льда при радиационном нагреве внутри камеры	111
Сенченко В.Н., Гаврильев А.Ч., Мельников С.А., Хищенко К.В. Изучение теплового расширения тугоплавких металлов в твердом и жидком состоянии при быстром нагреве мощным импульсом тока	112
Середкин Н.Н., Хищенко К.В. Уравнения состояния периклаза и смесей на его основе при высоких давлениях и температурах в ударных волнах	113
Хищенко К.В. Простые уравнения состояния металлов при высоких внутренних энергиях и энтропиях	114
 Секция 5. Тепломассообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах, процессы в разреженных газах и плазме	
Ашихмин А.Е., Булатова Е.В., Пискунова А.Е., Пискунов М.В. Управление гидродинамикой формирования альгинатных микрокапсул в чипах с регулируемой прекерамическими полимерами смачиваемостью стенок микроканалов	117
Биккинина Н.Б., Солнышкина О.А. Влияние формы и пространственного распределения пинов на эффективность теплообмена в микроканалах	118
Булатова А.З., Солнышкина О.А. Влияние вариации высоты пинов на процессы тепло и массопереноса в микротеплообменниках.....	119
Зорькина А.И., Роньшин Ф.В. Исследование кипения в плоских микроканалах	122
Коваленко П.В., Квасников Л.Г., Орлов А.Д. Численное моделирование осесимметричной двумерной модели дугового плазмотрона постоянного тока	121
Коробейщиков Н.Г., Николаев И.В. Энергообмен и массоперенос при наноструктурировании поверхности полупроводников кластерными ионами аргона	122
Ненарокомов А.В., Зинкевич В.П. Влияние ширины зазора между экранами на характеристики экранно-вакуумной теплоизоляции.....	123
Пискунов М.В., Ашихмин А.Е., Пискунова А.Е., Петрова Ю.Ю., Булатова Е.В., Зеленцов Д.О. Капиллярное микрокапсулирование водно-спиртового экстракта тимьяна в микрофлюидных системах с фокусировкой потока	124

Рыбакин Б.П. Моделирование ранних стадий формирования протозвезд	125
Солнышкина О.А., Батыршин Э.С. Численное и экспериментальное исследование влияния конфигурации микроканалов на эффективность теплопереноса	126

Секция 6. Электрофизические явления в газовых и жидких средах

Васильков С.А. Компьютерное моделирование эмульсии типа вода в диэлектрике в электрическом поле с учётом некоалесценции	129
Коробейников С.М., Герасимов В.Е. Особенности работы масляных выключателей	130
Карпов Д.И., Ридель А.В., Коробейников С.М., Савенко Р.А. Иницирование ионизирующими излучениями газового разряда в гелиевом пузырьке в трансформаторном масле	131
Коробейников С.М., Герасимов В.Е. Исследование электрической прочности трансформаторного масла содержащего проводящие частицы	132
Куперштох А.Л., Медведев Д.А. Электрогидродинамическое управление толщиной пленки жидкости для охлаждения нагретой поверхности	133
Ридель А.В., Коробейников С.М., Бычков А.Л., Ломан В.А. Неустойчивость поверхности газового пузырька как механизм иницирования стримеров в жидком диэлектрике	134
Савенко Р.А., Карпов Д.И. Влияние степени деформации гелиевого пузырька в трансформаторном масле на характеристики частичного разряда	135
Андрющенко В.А., Смовж Д.В. Оптимизация параметров плазматронов для их эффективного использования в рудотермических реакторах	136

Секция 7. Теплообмен и гидродинамика в технологических процессах, энергоэффективность, защита окружающей среды

Солодовникова Ж.А., Кузнецов Г.В., Баранова А.А., Некрасов С.С., Плинокосов К.М. Отличительные характеристики воспламенения древесно-угольных пеллет в условиях низко- и высокотемпературных нагревов	139
Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Баранова А.А., Некрасов С.С., Плинокосов К.М. Особенности зажигания частиц древесной биомассы при низко- и высокотемпературных нагревах	140
Белявская П.В., Щинников П.А. Динамические особенности предварительной газификации и их влияние на выбросы при сжигании биомассы в кипящем слое	141
Васильев А.Ю. Современное состояние и перспективы развития авиационных двигателей в части технологий сжигания топлив	142
Веретенников С.В., Благушин И.А. Исследование влияния акустического излучения на устойчивость фронта пламени в противоточном закрученном потоке	143
Вишняков Е.А., Сапогов А.В., Тутукин А.В. Исследование локальных характеристик течения в обогреваемом семистержневом макете ТВС с самодистанционирующимися твэлами	144

Журавлев Д.В., Сайфуллин Д.Д., Васильков С.А., Чирков В.А., Елагин И.А., Алексеева Е.В., Левин О.В. Анализ эффективности защитного полимерного слоя литий-ионной батареи при наличии сквозных проколов	145
Иванов Р.И., Евдокимов О.А., Гурьянов А. И. Особенности сжигания безуглеродного топлива в противоточных горелочных устройствах	146
Ковалев Д.Н., Антонов Д.В. Микроволновый способ интенсификации микровзрывного распада капель	147
Кудияров В.Н., Эльман Р.Р., Курдюмов Н.Е. Численное моделирование системы хранения водорода на основе гидрида магния с улучшенными теплофизическими характеристиками	148
Кузнецов В.А., Дектерев А.А., Кравченко И.В., Мальцев Л.И., Алексеенко С.В. Расчетное исследование процессов сжигания ВУТ на модернизированном котле К-50-40/14	149
Литвинцев К.Ю., Дектерев Д.А., Сентябов А.В., Финников К.А., Лобасов А.С. Гидродинамический стенд для исследования городского острова тепла над красноярском в условиях атмосферной инверсии	150
Лутченко И.И., Палкин Е.В., Мулляджанов Р.И., Алексеенко С.В. Управление изотермическим течением в модельной камере сгорания: моделирование крупных вихрей и анализ восприимчивости	151
Мешкова В.Д., Шульженко П.Д., Дектерев А.А., Минаков А.В. Исследование закономерностей влияния аэродинамики и тепломассообмена на биоклиматический комфорт в городских морфотипах в разных климатических поясах	152
Молотова И.А., Виноградов М.М., Забиров А.Р., Губанова Т.А., Дебердеев Д.Д., Молотов И.М., Ягов В.В. Условия возникновения высокоинтенсивного режима при охлаждении горячих тел в жидкостях	153
Сыродой С.В., Нигай Н.А., Солодовникова Ж.А., Плинокосов К.М., Кузнецов Г.В. Сравнительный анализ процессов тепломассопереноса при сушке диспергированной и однородной древесины	154
Соколова Е.А., Аболгасем М., Садеги Х., Газан С.Х. Двухконтурная система хранения энергии на фазопереходных материалах с параллельной зарядкой и разрядкой	155
Солодовникова Ж.А., Сыродой С.В., Сенчихин Д.К., Баранова А.А., Замалтдинов Р.Р. Анализ влияния вида древесины на интенсификацию золowego заноса типичных поверхностей теплообмена	156

ДЛЯ ЗАМЕТОК

[illegible]

Ответственный за выпуск
к.ф.-м.н. Макаров М.С.

Вёрстка
Лукьянов Ал.А.

Обложка
Убиенных А.Д.

Подписано в печать 05.09.2026. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 21,5.
Тираж 19 экз. Заказ №849

Отпечатано в типографии
ООО «Дигит Про»
г. Новосибирск, ул. Журина 78 оф 208



сайт конференции



канал в MAX

*Ждём встречи
с Вами!*