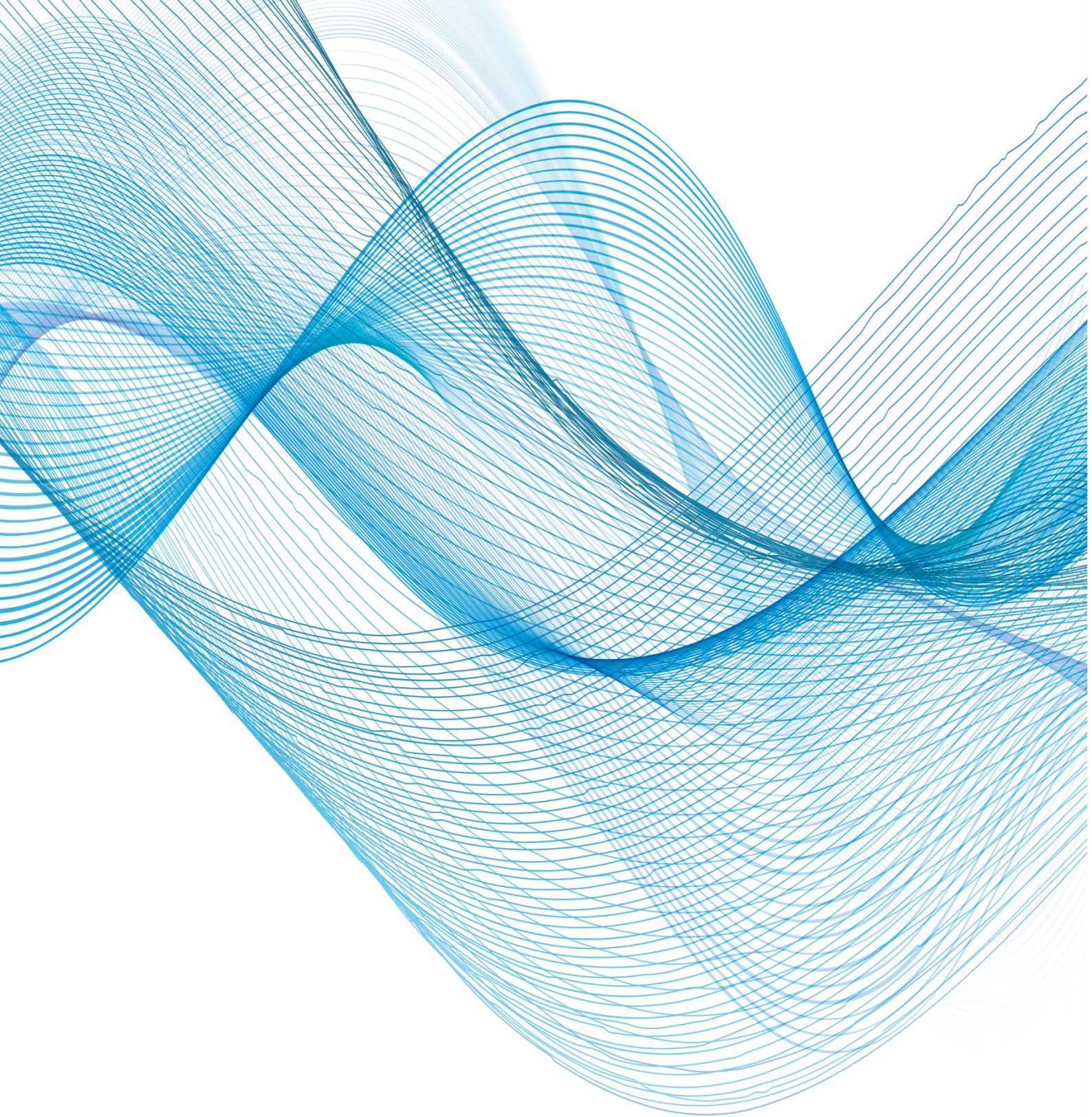




СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

XVIII Всероссийская школа-конференция
«Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики»

30 Июня - 4 Июля 2025, Москва, Россия

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

XVIII ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ

Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики

30 июня – 4 июля 2025 г.

Москва, Россия

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Москва, 2025

Сборник содержит доклады XVIII Всероссийской школы-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». В сборнике представлены доклады по направлениям: турбулентные течения, тепло- и массообмен в однофазных средах, тепломассообмен и гидродинамика в многофазных средах, тепломассообмен при фазовых превращениях, интенсификация теплообмена, теплофизика микро- и наносистем, теплофизические свойства веществ и лучистый теплообмен, процессы в разреженных газах и плазме, теплофизические проблемы энергетики, энергоэффективность и энергосбережение.

XVIII Всероссийская школа-конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», организуемая Институтом теплофизики СО РАН при поддержке Московского энергетического института, Новосибирского государственного университета, Лаборатории перспективных технологий энергоэффективных технологий (ЛабПЭТ) и Сибирского отделения Российской академии наук, пройдет с 30 июня по 4 июля 2025 года в Москве.

Организационный комитет

Председатель

Маркович Д.М., академик РАН

Заместители председателя

Сиковский Д.Ф., к.ф.-м.н.

Скорнякова Н.М., д.т.н.

Учёные секретари

Пещенюк Ю.А.

Лукьянов Ан.А.

Технический комитет

Сластная Д.А.

Лукьянов Ал.А.

Зорькина А.И.

Ситников В.О.

Алехин С.А.

Поройков А.Ю. к.т.н.

Зубова С.В., ООО «Научный Сервис»

Члены оргкомитета

Абдуллаев Р.Н., к.ф.-м.н.

Алексеев С.В., академик РАН

Барткус Г.В., к.ф.-м.н.

Вожаков И.С., к.ф.-м.н.

Гатапова Е.Я., к.ф.-м.н.

Дектерев Д.А., к.ф.-м.н.

Дулин В.М., профессор РАН

Зарипов Д.И., д.ф.-м.н.

Ковалев А.В., к.ф.-м.н.

Копьев Е.П., к.т.н.

Кочкин Д. Ю., к.ф.-м.н.

Лобанов П.Д., д.т.н.

Макаров М.С., к.ф.-м.н.

Марчук И.В., профессор РАН

Мелешкин А.В., к.т.н.

Минаков А.В., д.ф.-м.н.

Миськив Н.Б., к.т.н.

Мулладжанов Р.И., д.ф.-м.н.

Наумов И.В., профессор РАН

Павленко А.Н., чл.-корр. РАН

Пахомов М.А., профессор РАН

Перфильева К.Г., к.ф.-м.н.

Роньшин Ф.В., к.ф.-м.н.

Сердюков В.С., к.ф.-м.н.

Скрипкин С.Г., к.ф.-м.н.

Смовж Д.В., д.ф.-м.н.

Старинская Е.М., к.ф.-м.н.

Старинский С.В., д.ф.-м.н.

Стрижак П.А., д.ф.-м.н.

Суртаев А.С., к.ф.-м.н.

Терехов В.В., профессор РАН

Токарев М.П., к.т.н.

Федяева О.Н., профессор РАН

Чеверда В.В., к.ф.-м.н.

Черданцев А.В., д.ф.-м.н.

Чернов А.А., профессор РАН

Мероприятие проводится при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 25-79-30002, <https://rscf.ru/project/25-79-30002/>) и группы компаний «Политех оборудование».

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

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

Алексеев С.В.

*Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
asvasus@yandex.ru*

Геотермальная энергия относится к возобновляемым источникам энергии и считается самым экологически чистым видом энергии, поскольку при ее добыче не выделяются парниковые газы и не требуется большого количества земли. Геотермальные ресурсы делятся на гидротермальные и петротермальные. Гидротермальные ресурсы представлены геотермальными флюидами (вода, пар, пароводяная смесь). Их запасы относительно невелики. Петротермальные ресурсы (или глубинное тепло) представляют собой часть тепловой энергии, которая заключена в сухих горных породах, находящихся на глубинах 3÷10 км (и более). Их температура достигает 350°C. Запасы именно петротермальной энергии практически неисчерпаемы, однако освоение этого вида энергии находится на стадии научных исследований и пилотных проектов в силу огромной сложности, сравнимой по масштабам с термоядом. Геотермальная энергия применяется как для производства электрической энергии, так и теплоснабжения, включая прямое использование тепла. Геотермальная энергия находится в числе самых дешевых источников энергии. Несмотря на очевидную привлекательность, вклад тепла Земли в мировую энергетику пренебрежимо мал, что явно не соответствует его потенциалу [1].

В представленной лекции дается анализ развития геотермальной энергетики с надеждой на преобладающий вклад этого вида энергии в будущем, особенно в связи с необходимостью принимать кардинальные решения в борьбе с изменением климата. Поставлены первоочередные ключевые задачи, среди которых: (1) Развитие и масштабное применение геотермальных тепловых насосов; (2) Преимущественное развитие бинарных циклов на основе органического цикла Ренкина, в том числе для задач энергосбережения; (3) Освоение глубинного тепла, как самого перспективного вида геотермальной энергии; (4) Извлечение из термальной воды ценных химикатов, в первую очередь лития; (5) Развитие новых эффективных технологий бурения, которые могут иметь революционное значение не только для геотермальной энергетики, но и многих других отраслей промышленности; (6) Разработка и применение геофизических методов диагностики.

Литература

1. Алексеев С.В. Геотермальная энергия // В книге «10 Прорывных Идей в Энергетике на Ближайшие 10 Лет», Международная Ассоциация «Глобальная энергия» - 2022. - С. 147 – 167.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Бондарь Е.А.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
bond@itam.nsc.ru

При полете в верхних слоях атмосферы, в вакуумной технике и различных микроустройствах встречаются газовые течения, в которых средняя длина свободного пробега молекул сопоставима с размером изучаемого объекта. Такие течения называются разреженными. Для их теоретического описания подход, в рамках которого газ считается сплошной средой, имеет существенные ограничения. В частности, такие модели, как уравнения Навье–Стокса–Фурье дают существенную ошибку в определении параметров разреженных течений [1]. Детальное описание таких течений обеспечивает кинетический подход, основанный на системе обобщенных уравнений Больцмана для смеси газов (см., например, [2]).

В докладе представлен обзор современных математических моделей и методов вычислительной динамики разреженных газов (как кинетических, так и континуальных) с акцентом на аэрокосмические приложения, в частности, задач высотной аэротермодинамики космических аппаратов. Рассмотрены, в частности, модельные кинетические [3] и моментные [4] уравнения, методы прямого численного решения уравнения Больцмана [5], активно развивающиеся в последние годы методы прямого молекулярного моделирования (DMS) [6] и событийного молекулярно-динамического моделирования (EDMD) [7]. Основной акцент сделан на обзоре возможностей и перспектив развития метода прямого статистического моделирования Монте-Карло (DSMC или ПСМ) [8], являющегося в последние десятилетия основным инструментом исследования высокоскоростных разреженных течений. Представлен опыт ИТПМ СО РАН в создание отчуждаемых программных систем [9], основанных на методе ПСМ и используемых для решения прикладных промышленных задач. Рассмотрены современные достижения в использовании метода ПСМ для изучения на молекулярно-кинетическом уровне различных фундаментальных проблем, в том числе турбулентности [10], поверхностных химических реакций [11] и газовой детонации [12].

Литература

1. Коган М. Н. Динамика разреженного газа. Наука, 1967.
2. Nagnibeda E. and Kustova E. Non-Equilibrium Reacting Gas Flows. Kinetic Theory of Transport and Relaxation Processes. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
3. Шахов Е.М. Об обобщении релаксационного кинетического уравнения Крукса // Изв. АН СССР. МЖГ. 1968. № 1. С. 156–161.
4. Struchtrup, H. Macroscopic Transport Equations for Rarefied Gas Flows—Approximation Methods in Kinetic Theory. 2005 IO Interaction of Mechanics and Mathematics Series. Heidelberg: Springer.
5. Aristov V. V. and Cheremisin F. G. The conservative splitting method for solving Boltzmann's equation. USSR Comput. Math. Math. Phys. 1980. T. 20. № 1. P. 208–225.
6. T. E. Schwartzenuber, M. S. Grover, P. Valentini, Direct molecular simulation of nonequilibrium dilute gases. J. Thermophys. Heat Transf. 32, 892–903 (2018).
7. A. Yakunchikov, V. Kosyanchuk, “Application of event-driven molecular dynamics approach to rarefied gas dynamics problems”, Computers & Fluids, 170 (2018), 121
8. Bird G. A. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. Clarendon Press, Oxford, 1994.
9. А. В. Кашковский и др. Семейство программных систем SMILE для прямого статистического моделирования течений разреженных газов. 2025. Инженерно-физический журнал (принята к публикации).
10. M. A. Gallis et al. Navier-Stokes Equations Do Not Describe the Smallest Scales of Turbulence in Gases. Phys. Rev. Let. 128, 114501 (2022)
11. Molchanova (Shumakova) A. N. et al. Detailed DSMC surface chemistry model. AIP Conf. Proc. 2014. Vol. 1628, No. 1. Pp. 131–138.
12. Bondar Y. A., Maruta K., and Ivanov M. S. Hydrogen–oxygen detonation study by the DSMC method. AIP Conf. Proc. 2011. Vol. 1333, No. 1. Pp. 1209–1214

СМАЧИВАНИЕ, ШЕРОХОВАТОСТЬ И НЕМНОГО СОЛИ КАК ПУТЬ К БЫСТРЫМ ТЕЧЕНИЯМ В ТОНКИХ КАНАЛАХ

Виноградова О.И.*

*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Ленинский проспект 31, 119071 Москва*

*[*ovinoograd@yahoo.com](mailto:ovinoograd@yahoo.com)*

В последние десятилетия стремление к миниатюризации распространилось на область жидкостей и привело к бурному развитию микро- и нанофлюидики. В связи с этим возникла проблема поиска более эффективных механизмов генерации быстрых потоков в тонких каналах, которые оказывают огромное вязкое сопротивление течению, индуцированному механически, т.е. возникающему благодаря перепаду давления на концах канала.

Одна из стратегий создания управляемых быстрых течений на малых масштабах заключается в снижении трения о стенки, т.е. (химической и физической) модификации поверхностей стенок с целью сделать их скользкими. Другим перспективным направлением является использование так называемых межфазных транспортных явлений, возникающих в ответ на градиент электрического потенциала, концентрации растворителя и т.д.

В докладе эти возможности иллюстрируются на двух примерах, а именно:

1) Обсуждается, как комбинация гидрофобности и шероховатости поверхности стенок приводит к гигантскому межфазному скольжению и низкому гидродинамическому сопротивлению течению под действием перепада давления;

2) Показывается, что перепад концентрации соли на концах канала с одинаковым гидростатическим давлением индуцирует быстрое (диффузиоосмотическое) течение жидкости, т.е. химическая энергия конвертируется в механическую без притока энергии извне.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОМПОНЕНТ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК, ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ

Дедов А.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

В докладе будут раскрыты следующие пункты:

- современное состояние термоядерных исследований в РФ и мире, теплофизические задачи без решения которых невозможен термоядерный реактор;
- экспериментальная база МЭИ для плазменно-пучковых испытаний (включая посещение лабораторий в согласованное время);
- результаты экспериментальных исследований (термостабилизация капиллярно-пористых систем, охлаждение диспергированным потоком);
- плазменно-пучковое воздействие как способ создания материалов с новыми свойствами.

РАЦИОНАЛЬНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Дектерев А.А.

Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
dekterev@mail.ru

Доклад посвящен анализу подходов к математическому моделированию процессов в энергетических установках. Используются данные выполненных расчетных исследований, материалы по разработке CFD ПО, подготовленные автором и его коллегами за длительный период времени.

Рассматриваются камеры сгорания энергетических установок, сжигающих газообразное, жидкое и твердое топливо с сопутствующими им устройствами: форсунками, горелками, теплообменным оборудованием и трубопроводами.

Комплекс физико-химических процессов, протекающих в камерах сгорания установок - это пространственное турбулентное течение; сложный и сопряженный теплообмен (теплопроводность, конвекция, излучение); химическое реагирование; процессы в многофазной среде. Для жидкого топлива - это процесс истечения жидких струй, их распад на капли, дробление и испарение капель. Для твердого 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.

В докладе автор, на примере результатов собственных исследований, делает попытку сформулировать подходы к рациональному математическому моделированию процессов в энергетических установках.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЕНИЯ НА ТЕПЛООТДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ: ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕАЛИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

Левин А.А.

*Новосибирский государственный университет,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН*

Пузырьковое кипение является ключевым процессом для систем теплообмена, определяющим эффективность энергетических установок широкого назначения. Элементарным объектом изучаемого процесса является паровой пузырек, характеристики которого (размер, частота зародышеобразования, плотность центров парообразования) оказывают огромное влияние на теплообмен. В рамках работы обсуждаются эволюция экспериментальных исследований, неразрывно связавшая методы физического и численного моделирования. Поднимаются критически важные вопросы правомочности применения существующих статических подходов к определению замыкающих соотношений в детализированных численных моделях теплообмена, а также необходимости расширения базы эмпирических сведений о протекании пузырькового кипения.

Работа поддержана грантом РФФИ № 22-19-00092

РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МИКРО И НАНОФЛЮИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЗАДАЧАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ИНДУСТРИИ

Минаков А.В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

*[*AMinakov@sfu-kras.ru](mailto:AMinakov@sfu-kras.ru)*

Геополитическая ситуация и колебания мировых цен на энергоносители диктуют необходимость разработки и внедрения инновационных, высокоэффективных технологий добычи углеводородов. Одним из перспективных направлений является применение микро- и нанofлюидных технологий, способных кардинально изменить подход к исследованиям в области разработки месторождений. Центральной проблемой, решаемой с помощью микро- и нанofлюидных технологий, является комплексное изучение многофазных потоков в условиях, имитирующих пористую среду нефтегазового пласта. Для этого разрабатываются и применяются микрофлюидные чипы. Эти устройства, представляющие собой миниатюрные «лаборатории на чипе», позволяют проводить эксперименты с образцами горных пород и флюидов в контролируемых условиях, моделируя процессы вытеснения нефти и газа [1]. Это позволяет значительно снизить затраты на исследования и ускорить процесс разработки новых технологий.

Разрабатываются новые экспериментальные методики, основанные на применении микрофлюидных устройств, позволяющие с высокой точностью исследовать физико-химические процессы, протекающие в пористой среде на микро- и наноуровне. Особое внимание уделяется использованию наносuspensions и наномульсий для увеличения нефтеотдачи пластов. Наночастицы, благодаря своим уникальным свойствам, улучшают смачиваемость пор, снижают поверхностное натяжение и изменяют реологические свойства нефти, что приводит к более полному вытеснению углеводородов из пласта [2]. Несмотря на значительный потенциал, внедрение микро- и нанofлюидных технологий сопряжено с определёнными сложностями. Это включает в себя необходимость разработки специализированного оборудования, создание высокоточных методов измерения и контроля, а также необходимость проведения масштабных полевых испытаний для подтверждения эффективности технологий. Дальнейшие исследования в этой области являются важной задачей для обеспечения устойчивого развития и повышения конкурентоспособности российской нефтегазовой индустрии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>).

Литература

1. Bazazi P., Sanati-Nezhad A., Hejazi S.H. Role of chemical additives on water-based heavy oil mobilization: A microfluidic approach // Fuel. – 2019. – V. 241, p.195-1202.
2. Киреев В. Нанотехнологии: история возникновения и развития // – Наноиндустрия (2008) №2, с.2–10.

ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕГРЕВА ЖИДКОСТЕЙ: ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕКУЩИЕ ЗАДАЧИ / К 60-ЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ МЕТОДА ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА

Скрипов П.В.

*Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а
pavel-skrpov@bk.ru*

Аннотация. В докладе будут рассмотрены следующие вопросы: история исследований явления перегрева, начало отсчета – первые систематические работы сотрудников университета Торонто, осуществленные сто лет назад; история исследований, осуществленных в Уральской теплофизической школе; современные методы и результаты измерения температуры достижимого перегрева, в том числе, методом импульсного нагрева проволочного зонда, открывшим путь к изучению термонеустойчивых объектов; свойства перегретых жидкостей и сверхкритических флюидов в масштабе малых характерных объемов и времен; характерные черты вскипания растворов с ограниченной (в координатах концентрация – температура) растворимостью компонентов, имеющих нижнюю критическую температуру растворения, в областях не вполне устойчивых (находящихся выше бинодали жидкость-жидкость или бинодали жидкость-пар) и неустойчивых (находящихся выше спинодали жидкость-жидкость) состояний; перспективные, применительно к современным технологиям, задачи в области перегрева и фрагментации сложных объектов.

ПАНОРАМНЫЕ МЕТОДЫ 3D ДИАГНОСТИКИ СКОРОСТИ ГИДРОАЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОК

Токарев М.П.*

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

*[*mtokarev@itp.nsc.ru](mailto:mtokarev@itp.nsc.ru)*

В докладе представлен обзор современных панорамных методов оптической диагностики потоков, которые позволяют экспериментально получать 3D распределения скорости течения [1] с акцентом на современные методы Лагранжевой трассировки частиц.

Трехмерные оптические методы цифровой трассерной визуализации (Tomographic Particle Image Velocimetry, 3D Particle Tracking Velocimetry и 3D Lagrangian Particle Tracking) [2] используются для измерения скорости в объеме потока в гидроаэродинамическом эксперименте. Данное семейство методов имеют одинаковую экспериментальную схему регистрации изображений трассеров и разные подходы для дальнейшей обработки полученных данных. В исследуемое течение добавляются трассеры. Поток, подобно традиционным PIV методам, освещается лазерными импульсами с контролируемой временной задержкой между ними. При этом область освещения не является локализованной в плоскости. Рассеянный свет от частиц регистрируется на три или более цифровые камеры, ориентированные под различными направлениями к области измерения. На фотоматрицу цифровой камеры проецируется распределение света, рассеянного частицами в данном направлении. Истинные положения трассеров в измерительном объеме потока восстанавливаются методами реконструкции по полученным изображениям частиц с использованием информации о пространственной калибровке камер. Мгновенная картина течения оценивается по смещениям частиц в измерительном объеме потока за время между вспышками лазера.

В докладе подробно рассмотрены этапы трассировки Лагранжевых частиц методом STV [2] с вариантами последующей оценки трехмерного поля давления [3] по информации из реконструированного набора треков частиц во времени.

Примеры входных данных и результатов анализа приведены из лабораторных натурных и численных экспериментов, а так же соревнования First LPT and DA Challenge [4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 19-79-30075, <https://rscf.ru/project/19-79-30075/>).

Литература

1. Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice // Measurement Science and Technology. – 2012. – V. 24. N. 1: 012001.
2. Schanz D., Gesemann S., Schröder A. Shake-The-Box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities // Exp. Fluids. – 2016. – V. 57. N. 70, p.1-27.
3. Bobrov M., Hrebtov M., Ivashchenko V., Mullyadzhyanov R., Seredkin A., Tokarev M., Zaripov D., Dulin V. and Markovich D. Pressure evaluation from Lagrangian particle tracking data using a grid-free least-squares method // Measurement Science and Technology. – 2021 – V. 32, 084014.
4. Sciacchitano A., Leclaire B., Schröder A. Main results of the first Data Assimilation Challenge // In 14th International Symposium on Particle Image Velocimetry – ISPIV. – 2021 – August 1–5, 2021, p.1-13.

НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИКИ- ТЕПЛОФИЗИКА НАНОСИСТЕМ

Хвесюк В.И.

Последние годы характеризуются быстрым развитием теплофизики наносистем, что связано с большими перспективами их использования в различных областях науки и передовых технологий. Наиболее интенсивно изучаются следующие объекты: наноленты из графена, квантовые точки, наноплёнки, нанонити из диэлектриков и полупроводников. Интерес к ним связан с тем, что они обладают необычными свойствами, их использование позволит существенно увеличить характеристики электронных устройств, лазеров, дисплеев, световодов, медицинских устройств и многого другого. Большой интерес к направлению подтверждается присуждением пяти нобелевских премий за последние несколько десятилетий. Впервые сформулировано определение этого направления.

Основами теории переноса тепла в наносистемах являются анализ колебаний регулярно расположенных ионов в электронном газе и статистическая теория фононного газа, принципиально отличающаяся от классической статистики разреженных газов. Отличие - в том, для этих систем необходимо учитывать сложные много частичные взаимодействия. Для решения этих проблем разработаны теория функционала плотности (нобелевская премия, 1998) и методы машинного обучения на основе нейронных сетей (нобелевская премия, 2024). Полученные решения показывают ряд необычных результатов переноса тепла, отсутствующих в рамках классической теплофизики.

ВОЛНОВЫЕ РУЧЕЙКОВЫЕ ТЕЧЕНИЯ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Черданцев А.В.^{1*}, Актёршев С.П.¹, Гузанов В.В.¹, Квон А.З.¹, Бобылев А.В.¹

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
**cherdantsev@itp.nsc.ru*

Ручейковое течение представляет собой течение пленки жидкости, ограниченное с двух сторон контактными линиями. Такая ситуация возможна при течении по поверхностям сложной формы, а также при орошении поверхностей с низкой смачиваемостью и недостаточном удельном расходе жидкости. Переход к ручейковому течению может быть спровоцирован неустойчивостью Рэлея-Тэйлора, Марангони или Сафмана-Тэйлора. В общем случае ручейковое течение неустойчиво к малым возмущениям, которые развиваются в сложную систему нелинейных волн. Исследования развитых волн на поверхности ручейков единичны: необходимость учитывать влияние контактных линий делает задачу существенно трехмерной. Вкупе с нелинейностью волн это осложняет теоретическое моделирование, а также предъявляет высокие требования к верификационным экспериментам.

В данной работе приводится описание теоретических и экспериментальных подходов, применяемых совместно для исследования трехмерных волновых режимов ручейкового течения по плоским и цилиндрическим поверхностям в широком диапазоне значений угла наклона поверхности к горизонту, ширины ручейка и плотности орошения. Рассмотрена модель равновесной формы ручейка, упрощенная квазидвумерная модель развитого нелинейного волнового течения, ее развитие в трехмерную область. Все модели тестируются путем прямого сравнения с экспериментальными данными по пространственно-временной эволюции мгновенных трехмерных полей толщины пленки, полученных методом лазерно-индуцированной флюоресценции [1], а также мгновенных полей скорости в плоскости, параллельной твердой поверхности, на различных глубинах жидкости, полученных методом PTV с использованием пленоптической камеры [2].

Результаты сравнения демонстрируют высокую достоверность разработанных теоретических моделей в диапазоне умеренных значений плотности орошения [3]. При высоких расходах жидкости в центральной части ручейка инициируется переход к турбулентности. Работа в этой области режимов требует дальнейшего развития теоретических подходов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 19-79-30075, <https://rscf.ru/project/19-79-30075/>).

Литература

1. Cherdantsev A., Bobylev A., Guzanov V., Kvon A., Kharlamov, S. Measuring liquid film thickness based on the brightness level of the fluorescence: Methodical overview // Int. J. Multiph. Flow (2023) 168, 104570.
2. Kvon A., Kharlamov S., Bobylev A., Guzanov V. Investigation of the flow structure in three-dimensional waves on falling liquid films using light field camera // Exp. Therm. Fluid Sci. (2022) 132, 110553.
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 // Int. J. Multiph. Flow (2024) 181, 104990.

ПАРОВЫЕ ВЗРЫВЫ: ФИЗИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ И ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Якуш С.Е.^{1*}, Сиваков Н.С.¹

*1) Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва, Россия **
yakush@ipmnet.ru

Взрывное вскипание теплоносителя при попадании в него высокотемпературного расплава, получившее название парового взрыва, привлекает неизменный интерес исследователей на протяжении в связи с проблемами безопасности атомной энергетики при тяжелых авариях. Опасности, связанные с контактом высокотемпературной и легкокипящей жидкостей также актуальны для металлургии, химической промышленности, аналогичные явления возникают при подводных извержениях вулканов. Несмотря на то, что к настоящему времени сформировалось понимание основных стадий и закономерностей паровых взрывов, имеющиеся результаты в основном носят экспериментальный характер, а само явление характеризуется значительными неопределенностями, трудно поддающимися предсказательному моделированию [1]. В докладе рассмотрено современное состояние проблемы изучения парового взрыва, включая экспериментальные и теоретические исследования. Обозначены ключевые нерешенные проблемы – инициирование (триггеринг), зависимость от материала расплава, чувствительность характеристик взрыва к свойствам трехфазной среды (расплав – охладитель – пар), участие малой части массы расплава во взрывном взаимодействии и механизмы быстрой фрагментации расплава. Приведены результаты трехмерного численного моделирования паровых взрывов одиночных капель расплава в холодной воде, выполненные на основе детального описания трехфазной системы с разрешением межфазных поверхностей методом VOF. Продемонстрированы различные механизмы фрагментации капли расплава под действием инициирующего импульса давления, вызывающего коллапс паровой пленки, отделяющей расплав от воды. Обнаружено возникновение короткоживущей интенсивной микроструи воды при асимметричном схлопывании парового пузыря, показано, что удар этой струйки вызывает быструю фрагментацию расплава [2]. Проведены расчеты паровых взрывов нескольких расположенных рядом капель расплава при прохождении по жидкости волны давления. Изучение данного вида взаимодействия важно для понимания характера коллективных эффектов при крупномасштабных паровых взрывах, происходящих при фрагментации струи расплава при попадании в объем теплоносителя.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИПМех РАН (тема 124012500440-9).

Литература

1. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Термическое взаимодействие высокотемпературных расплавов с жидкостями // Теплофизика высоких температур (2022) 60, №2, с. 280–318.
2. Yakush S.E., Sivakov N.S. Numerical modeling of high-temperature melt droplet interaction with water // Annals of Nuclear Energy. Elsevier. – 2023. – V. 185, Paper 109718.

СЕКЦИЯ 1. ТУРБУЛЕНТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В ОДНОФАЗНЫХ СРЕДАХ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ СТЕНКИ НА ОБРАЗОВАНИЕ МАГНИТНО-КОНВЕКТИВНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ

Балабаев Н.Е.¹, Беляев И.А.²

1) *Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

2) *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

nikita.balabaev@mail.ru, bia@ihed.ras.ru

В перспективных термоядерных реакторах ключевую роль играют жидкометаллические потоки, подверженные воздействию мощных магнитных полей и термогравитационной конвекции. Однако современные исследования, основанные на упрощенных лабораторных экспериментах и численном моделировании, не учитывают экстремальные условия реальных реакторов: сверхсильные магнитные поля (до нескольких тесла) и интенсивные тепловые потоки (4-20 МВт/м²).

Взаимодействие магнитных полей с термогравитационной конвекцией представляет собой сложную задачу, поскольку оно зависит от множества факторов. Эти факторы описываются такими критериями подобия, как число Рейнольдса, число Гартмана, число Грасгофа и число Рэлея, а также ориентацией векторов скорости, магнитной индукции, теплового потока и гравитации. Для точного прогнозирования этих процессов необходимо расширение диапазона исследований, особенно в области высоких чисел Гартмана.

В данной работе экспериментально изучено влияние электропроводности стенок на формирование магнитно-конвективных пульсаций в вертикальном канале. Исследования проводились при опускном течении ртути в меденных трубах диаметром 40 мм с толщиной стенок 2,5 и 10 мм при равномерном обогреве. Для измерений использовались погружные микротермопарные зонды, позволившие детально изучить особенности теплопереноса.

Полученные результаты экспериментальных исследований влияния электропроводности стенки круглой трубы на формирование магнитно-конвективных пульсаций в вертикальном канале имеют важное значение для разработки надежных жидкометаллических систем термоядерных реакторов. В этих системах необходимо учитывать комплексное воздействие магнитных полей и тепловых потоков на динамику рабочей среды, что является критически важным для обеспечения стабильности и эффективности работы реакторов.

Литература

1. Батенин В. М. и др. Развитие экспериментальной базы для исследований МГД-теплообмена перспективных ядерных энергоустановок //Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53. – №. 6. – С. 934-934.
2. Belyaev I. et al. Temperature fluctuations in a nonisothermal mercury pipe flow affected by a strong transverse magnetic field //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Т. 127. – С. 566-572.
3. Лучинкин Н. А. и др. Гидравлическое сопротивление круглой трубы при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле //Письма в Журнал технической физики. – 2024. – Т. 50. – №. 21. – С. 47-50.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

Беляев И.А.^{1,2}, Миронов И.С.^{2*}

1) Национальный исследовательский университет «МЭИ» 111250, Москва,
Красноказарменная, 14, Стр.1

2) Объединенный Институт Высоких Температур РАН
125412, Москва, Ижорская 13, Стр.2

* mironov761@yandex.ru

Основной целью исследования является изучение средних характеристик потока и стадий трансформации струи жидкого металла под воздействием поперечного магнитного поля. Выявлено крайне нестационарное истечение затопленной струи жидкого металла в магнитном поле. Нестабильность и переход к турбулентности в осесимметричной струе вязкой жидкости без воздействия магнитного поля хорошо изучены в области механики жидкостей.

Известно, что струи нестабильны при любых значениях, кроме очень низких значений числа Рейнольдса. Нестабильность типа Кельвина-Гельмгольца приводит к образованию вихрей во внешних областях струи, быстрому искажению струи и развитию турбулентности. Процесс сильно зависит от условий на входе (форма входного отверстия, профиль скорости, наличие возмущений). Если жидкость является электропроводящей, сильное наложенное магнитное поле полностью изменяет поведение потока.

На рисунке 1 продемонстрировано представление об эволюции профиля продольной скорости струи в магнитном поле. Из-за возникающих токов вдоль магнитного поля, кинетическая энергия струи переносится силой Лоренца от центра к периферии, в следствии чего происходит деформация профиля из изначального круглого в плоский.

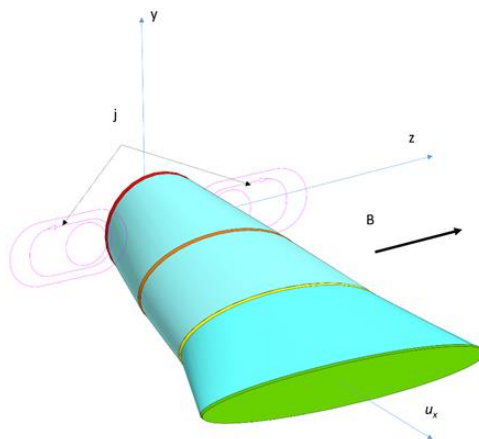


Рис1. Эволюция продольной компоненты скорости в магнитном поле.

В результате проведенных экспериментов была обнаружена значительная неустойчивость потока с высокоамплитудными колебаниями скорости. Эти колебания были зарегистрированы в области ниже по потоку от входа струи.

Литература

1. P. Davidson. Magnetic damping of jets and vortices. Journal of Fluid Mechanics, vol. 299 (1995), pp. 153–186.

РАЗРАБОТКА CFD-МОДЕЛИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА БР-1200

Дунайцев А.А.¹, Клементьев А.А.¹, Сапожников И.С.^{1*},

1) АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт
энерготехники имени Н.А. Доллежалея», Москва, Россия

*i.sapozhnikov@nikiet.ru

В рамках работ, направленных на развитие технологии быстрых реакторов нового поколения с замкнутым ядерным топливным циклом [1], проектируется коммерческий энергоблок со свинцовым теплоносителем БР-1200.

Для обоснования теплотехнической надежности и получения информации о теплогидравлике активной зоны (АЗ) разработана трехмерная теплогидравлическая CFD-модель течения теплоносителя на входе, выходе и внутри АЗ. Для твэльных пучков разрабатывалась сетка в потвэльном приближении и применялись замыкающие гидравлические соотношения, полученные предварительно. Распределение энерговыделения в АЗ определялось предварительно. Сборка модели, расчеты и обработка результатов проводились с применением программы Star-CCM+. Течение на входе и выходе АЗ (включая концевые участки изделий) моделировалось с применением валидированной [2] RANS-модели турбулентности k-ε Realizable.

Потери давления на АЗ составили 0,4 МПа. Получена информация о массо- и теплопереносе в поперечном направлении бесчехловой АЗ установки БР-1200 во всем объеме АЗ, включая входную и верхнюю камеры АЗ (рис. 1).

Применение методов CFD позволили оптимизировать геометрию корзины и концевых участков изделий АЗ с целью уменьшения гидравлического сопротивления и неравномерности напора на входном участке АЗ. С использованием разработанной модели проведены расчеты при блокировке проходного сечения тепловыделяющей сборки, а также при наличии неравномерности во входной камере АЗ, вызванной отключением одной из групп основного оборудования реакторной установки.

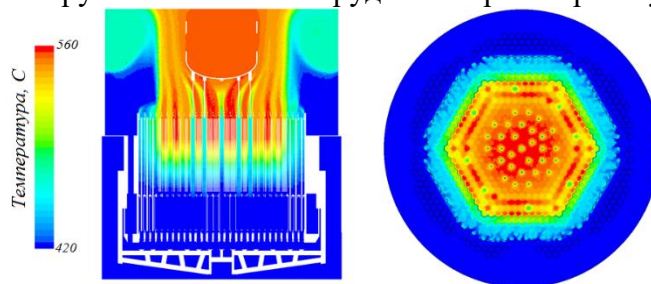


Рис. 1. Температура в продольном сечении (слева) и на выходе (справа) активной зоны.

Исследование выполнено в рамках выполнения НИОКР по договору между АО «НИКИЭТ» и государственной корпорацией «Росатом».

Литература

1. Адамов Е.О., Каплиенко А.В., Орлов В.В., Смирнов В.С., Лопаткин А.В., Лемехов В.В., Моисеев А.В. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ: от концепции к реализации технологии // Атомная энергия, 2020, № 129, с. 185–194.
2. Афремов Д.А., Сапожников И.С., Солонин В.И. Моделирование обменных расходных характеристик макета напорного коллектора БРЕСТ-ОД-300 // Вопросы атомной науки и техники. Ядерно-реакторные константы, 2023, выпуск 4, с. 174–183.

КОГЕРЕНТНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЯХ. ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Дулин В.М.

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

В данном докладе будут представлены результаты цикла исследований динамики закрученных струйных потоков с горением и без с использованием современных оптических методов. Акцент в докладе сделан на количественной оценке вклада когерентных вихревых структур в турбулентный тепломассоперенос, смесеобразование и локальное тепловыделение при горении. Целью работы является развитие методов управления тепломассообменом в закрученных потоках для повышения эффективности и экологичности сжигания углеводородного топлива.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Кочурин Е.А.^{1,2*}, Кузнецов Е.А.^{1,3}

1) Сколковский институт науки и технологий, Москва

2) Институт электрофизики УРО РАН, Екатеринбург

3) Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

* kochurin@iep.uran.ru

Впервые проведено прямое численное моделирование акустической турбулентности в трехмерной геометрии. В случае слабой нелинейности, когда амплитуды волн малы, реализуется спектр Захарова-Сагдеева $E(k) \sim k^{-3/2}$ не только для случая слабой дисперсии, но также в бездисперсионном пределе. В отсутствии дисперсии пространственный Фурье-спектр звуковых волн представляет собой дискретный набор узких конусов (джетов), уширяющихся в пространстве вследствие дифракционной расходимости, см. рис. 1. Для каждого джета дифракционные эффекты оказываются сильнее нелинейных, благодаря чему реализуется спектр слабой турбулентности Захарова-Сагдеева. Увеличение амплитуд волн приводит к доминированию нелинейных эффектов. В результате акустическая турбулентность переходит в режим сильной турбулентности, представляющей собой ансамбль случайных ударных волн со спектром Кадомцева-Петвиашвили: $E(k) \sim k^{-2}$. Результаты моделирования опубликованы в работе [1].

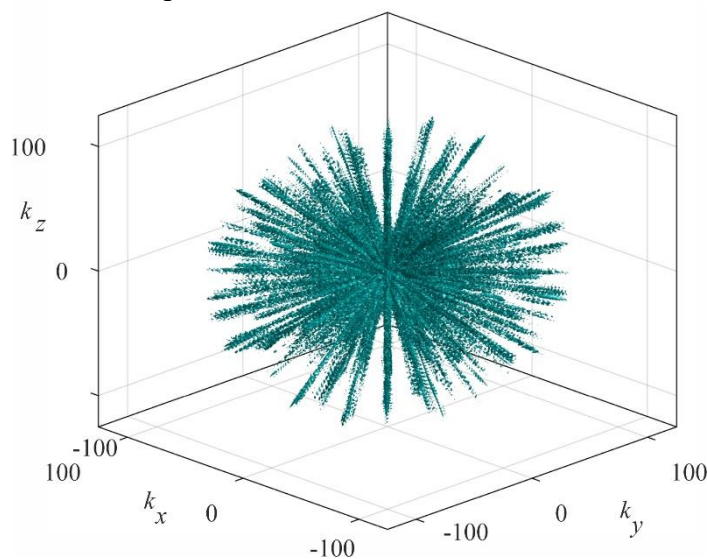


Рис. 1. Показана изоповерхность трехмерного Фурье-спектра турбулентных акустических пульсаций в режиме слабой турбулентности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №19-72-30028 (<https://rscf.ru/project/23-72-33008/>)

Литература

1. Kochurin E.A., Kuznetsov E.A. // – Physical Review Letters (2024) – 133, p. 207201

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПЛОСКО-СИММЕТРИЧНЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

Кочурин Е.А.^{1*}, Русских П.А.^{1,2}

1) Институт электрофизики Уральского отделения РАН, 620016 Екатеринбург, Россия

2) Сколковский институт науки и технологий, 121205 Москва, Россия

* kochurin@iep.uran.ru

Теория изотропной капиллярной турбулентности была разработана в конце 1960-х годов Захаровым и Филоненко [1]. К настоящему времени спектр турбулентности Захарова-Филоненко подтвержден с высокой точностью как экспериментально, так и численно. Однако в случае сильной анизотропии распространения волн, когда все волны коллинеарны, ситуация существенно меняется. В такой вырожденной геометрии условия резонансного взаимодействия перестают выполняться не только для трех волн, но и для четырех взаимодействующих волн. В данной работе проведено полностью нелинейное моделирование плоско-симметричной капиллярной турбулентности. В работе показано, что система взаимодействующих волн переходит в квазистационарное состояние с прямым каскадом энергии, несмотря на отсутствие резонансов низшего порядка. Рассчитанные спектры возмущений поверхности жидкости с высокой точностью описываются аналитическими оценками, полученными из размерностного анализа в предположении доминирующего влияния пятиволновых резонансных взаимодействий [2]. Детальное изучение статистических характеристик слаботурбулентного состояния не выявляло влияния каких-либо когерентных или сильно нелинейных структур. Проведенный корреляционный анализ высокого порядка указывает на множество нетривиальных пятиволновых резонансов. Показано, что процесс распада волны на две пары встречных волн отвечает за локальную передачу энергии в малые масштабы. В целом, результаты расчетов хорошо согласуются как с теорией слабой турбулентности, так и с недавними экспериментами, проведенными для капиллярных волн на поверхности ртути.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10012 (<https://rscf.ru/project/23-71-10012/>).

Литература

1. Захаров В.Е., Филоненко Н.Н. // – ПМТФ (1967) – 8, №62, с 62-67.
2. Кочурин Е.А. // – Письма в ЖЭТФ (2023) – 118, №12, с 889-895.

УПРАВЛЕНИЕ ПРЕДЕЛАМИ СУЩЕСТВОВАНИЯ МЕТАНО-ВОЗДУШНЫХ ПЛАМЕН ПУТЕМ МОДИФИКАЦИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННЫХ СМЕСЕЙ ВОДОРОДОМ

Крикунова А.И.^{1*}, Чешко А.Д.¹

1) Объединенный институт высоких температур СО РАН, Москва, Россия

[*krikunovaai@gmail.com](mailto:krikunovaai@gmail.com)

В настоящее время в технологических установках и двигателях транспортных средств интенсивно внедряется использование экологически чистого вида топлива-метана. Однако метано-воздушная топливная смесь отличается сравнительно узким диапазоном режимов горения и пониженной устойчивостью пламени. Для купирования этих недостатков возможно добавление в топливную смесь небольшого количества водородного горючего, за счёт малой задержки воспламенения и высокой скорости горения в предварительно перемешанной смеси обеспечивающего повышение устойчивости горения. В работе описываются результаты исследования такого способа повышения устойчивости.

Экспериментально определены диапазоны расширения скоростей устойчивого горения предварительно перемешанного метано-воздушного пламени при различном проценте добавления водорода в условиях нормальной и обратной гравитации. Показана возможность существования бедного метано-водородо-воздушного пламени в условиях обратной гравитации. Исследовано влияние добавления водорода на динамику и форму пламени в таких условиях. Показано большее влияние водорода в обеспечение устойчивого горения бедного пламени при обратной гравитации, чем при нормальной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024.

ЭВОЛЮЦИЯ ОДИНОЧНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ

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

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

**kutepova@itam.nsc.ru*

Методом прямого численного моделирования было выполнено исследование развития искусственно введенного теплового возмущения. Использовался расчетный код HyCFS-R [1], разработанный в ИТПМ СО РАН. Этот код использует многоуровневое распараллеливание: декомпозицию расчетной области и сообщения MPI для передачи данных между вычислительными узлами, Nvidia CUDA для графического сопроцессора и ниточное распараллеливание OpenMP на каждом вычислительном узле. Численные расчеты проводились на гибридном вычислительном кластере “Аеро” ЦКП ИТПМ СО РАН с использованием двух вычислительных узлов и четырех графических сопроцессоров Nvidia Tesla V100.

Основные параметры потока соответствовали реальным экспериментам, проводимым на аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН: число Маха потока $M=1.43$, число Рейнольдса $Re_x = 0,49 \cdot 10^6$, температура пластины $T_w=290K$. Численное моделирование данной задачи проводилось в расчетной области, которая представляла собой параллелепипед с общим количеством ячеек 117 млн. Тепловые возмущения возбуждались в виде прямоугольных импульсов, как это делалось ранее в работе [2], где представлено исследование возмущений от периодического теплового источника в сверхзвуковом пограничном слое. Для возбуждения возмущений использовались импульсы с частотой $f = 1 \text{ кГц}$ и длительностью рабочего цикла источника $D = 0,001$.

Был исследован вопрос эволюции неустойчивых возмущений в условиях взаимодействия пограничного слоя с ударной волной, которая задавалась с помощью граничных условий на верхней границе расчетной области. Показано, что применение достаточно простой модели поверхностного теплового источника позволяет успешно создавать возмущения в пограничном слое, которых достаточно для подробного частотного анализа и изучения процессов развития возмущений. Также проведенное исследование показало, что с помощью локализованного теплового источника можно эффективно влиять на размер отрывной области течения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 25-29-00436, <https://rscf.ru/project/25-29-00436/>).

Литература

1. Shershnev A., Kudryavtsev A., Kashkovsky A., Khotyanovsky D. HyCFS, a high-resolution shock capturing code for numerical simulation on hybrid computational clusters // AIP Conf. Proc. 1770, 11 (2016).
2. Kutepova A.I., Khotyanovsky D.V., Sidorenko A.A. Numerical simulation of the development of perturbations induced by a periodic heat source in a supersonic boundary layer // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2023, Vol. 64, No. 5, pp. 853–857.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ В ЦИЛИНДРЕ НА ПРОЦЕССЫ РАЗВИТИЯ БЛИЖНЕГО СЛЕДА

Лукьянов А.А. *, Ничик М.Ю., Лебедев А.С., Добросельский К.Г.

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

**lukyanov.alexey2018@yandex.ru*

Отрыв потока за плохообтекаемыми объектами является фундаментальной проблемой. Данное явление приводит к образованию крупномасштабных вихрей и развитию неустойчивости в сдвиговых течениях. Классическим примером явления, связанного с образованием вихрей за объектом, является обтекание кругового цилиндра в поперечном потоке [1]. Одним из возможных простых решений пассивного контроля и управления отрывом вихрей для цилиндра являются сквозные отверстия, которые выравнивают давление по разные его стороны [2].

В данной работе исследовано влияние угла наклона по отношению к потоку сквозных отверстий цилиндра на течение вблизи цилиндра, процессы развития и распада ближнего следа, а также возможности управления этими процессами. Для этого было рассмотрено турбулентное течение воды в гидродинамическом стенде, оборудованном PIV системой, в диапазоне чисел Рейнольдса $150 \times 10^3 < Re < 275 \times 10^3$. Эксперименты были проведены для двух цилиндров из стали диаметром $D = 26$ мм и длиной $L = 80$ мм: сплошного и с пятью сквозными, параллельными друг другу, отверстиями диаметром 3 мм с шагом 6 мм. Центральное отверстие расположено на половине длины цилиндра, остальные отверстия расположены симметрично.

В результате был проведен сравнительный анализ средних характеристик потока и ближнего следа при изменении угла наклона отверстий относительно направления потока (0° , 45° и 90°) для разных чисел Рейнольдса. На рис. 1 показано, что наличие сквозных отверстий, расположенных параллельно потоку (0°), значительно уменьшает размер зоны рециркуляции для числа Рейнольдса $Re = 275 \times 10^3$ по сравнению с обычным цилиндром.

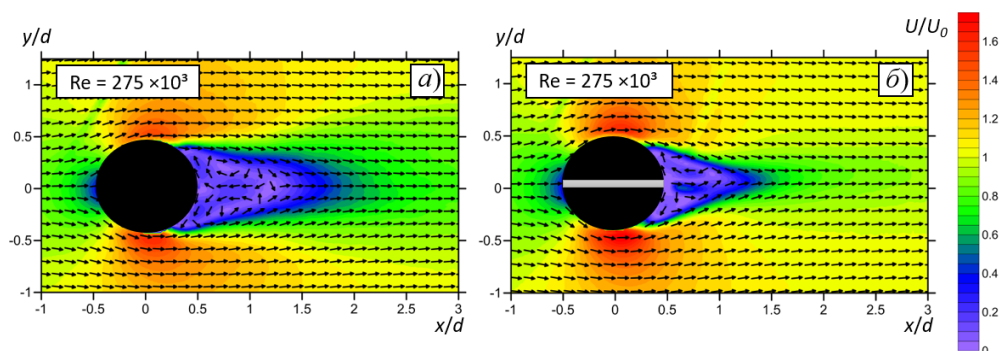


Рис. 1. Векторные поля средней скорости для экспериментов на классическом цилиндре (а) и цилиндре с отверстиями для угла наклона 0° (б).

Исследование выполнено за счет мегагранта № 075-15-2025-007, https://megagrant.ru/labs/lab_rus_1082740/

Литература

1. Choi H., Jeon W.P., Kim J. Control of flow over a bluff body // Annual Review of Fluid Mechanics. 2008. Vol. 40. P. 113-139.
2. Gao D. et al. Effects of steady wake-jets on subcritical cylinder flow // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2019. – Т. 102. – С. 575-588.

ВЛИЯНИЕ СТРУЙНОГО ВИХРЕГЕНЕРАТОРА НА КОГЕРЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ В СДВИГОВОМ СЛОЕ

Маркин В.В.^{*}, Поливанов П.А., Бунтин Д.А.

*Институт Теоретической и Прикладной Механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия*

^{}markin@itam.nsc.ru*

На текущий момент методы активного управления пограничным слоем интенсивно изучаются для улучшения характеристик перспективных летательных аппаратов. Одним из наиболее энергетически выгодных методов являются струйные вихрегенераторы, которые активно исследуются [1]. В большинстве исследований основной упор делается на измерение глобальных эффектов воздействия вихрегенерирующих устройств на течение, таких, как уменьшение размеров отрывных зон, увеличение критического угла атаки, рост коэффициента подъемной силы и т.д., однако редко уделяется внимание влиянию вихрегенераторов на нестационарные процессы, протекающие в турбулентном сдвиговом слое. Данная работа концентрируется на исследовании характерных масштабов турбулентности в отрывной области и влияния на них струйных вихрегенераторов.

Эксперименты проводились в АДТ Т-503 НГТУ. Модель представляла собой толстую пластину с обратным уступом и вихрегенератором. В работе на основе совместной обработки термоанемометрических и PIV данных [2] определены характерные пространственные и временные масштабы нестационарных структур в потоке за обратным уступом. Установлено, что активация вихрегенераторов приводит к значительному изменению масштабов нестационарных структур, которое зависит от интенсивности воздействия.

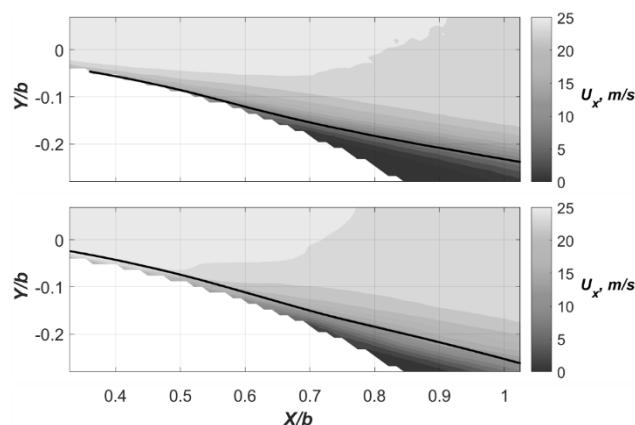


Рис. 1. Поле скорости за обратным уступом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 25-21-00187, <https://rscf.ru/project/25-21-00187/>). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП "Механика" (ИТПМ СО РАН).

Литература

1. Abbas A., de Vicente J., Valero E. Aerodynamic technologies to improve aircraft performance // Aerospace Science and Technology. - 2013. -Vol.28, No.1. -P. 100-132
2. Vishnyakov O.I., Polivanov P.A., Bountin D.A. Surface constant-temperature anemometer sensors used to analyze particle image velocimetry data // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. - 2024. -Vol.65, No.2. -P. 274-278

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ В УСЛОВИЯХ ОДНОФАЗНОГО ПОТОКА

Нугуманов Д.И. *, Бердов Р.Д., Волков Н.Н., Волкова Л.И.

АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Россия

*nugumanov.di@phystech.edu

Целью данной работы является проведение анализа данных [1] экспериментального исследования распределений тепловых потоков и статических давлений в тракте газодинамической трубы (ГДТ) при течении потока продуктов сгорания твердого топлива с крайне малым содержанием конденсированной фазы и определение расчетных методов прогнозирования реализуемых тепловых нагрузок в системах такого типа.

Для моделирования тепловых процессов в области сверхзвукового течения (зона 1), что соответствует начальному и центральному участку ГДТ, предлагается использовать комбинированный подхода: расчета течения коммерческими средствами численного моделирования и расчета локальных значений тепловых потоков при решении уравнений пограничного слоя в интегральной форме. На основе представлений о структуре течения в области псевдоскачка (зона 3), что соответствует выходному участку ГДТ, авторами предложена простая инженерная формула расчета действующих на стенки тепловых потоков. Отдельной особенностью обладает зона между сверхзвуковым потоком и областью развитого псевдоскачка (зона 2). На этом участке наблюдаются изменения параметров потока характерные для «отрывных зон». Для описания тепловых нагрузок в этой области предложена эмпирическая закономерность. Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных представлены на рисунке 1.

Предложенный подход отдельно опробован на другой ГДТ малых размеров, вид и условия испытаний описаны в работе [2]. При сопоставлении данных погрешность расчета не превысила 20 %, т.е. предложенный метод расчета показал хорошую применимость.



Рис. 1. Результаты расчета.

Литература

1. Нугуманов Д.И., Бердов Р.Д., Головатюк А.С., Киселева В.С., Тимаров А.Г. Экспериментальное определение тепловых нагрузок на конструкцию сверхзвукового выхлопного диффузора // Прикладная механика и техническая физика. - 2025. DOI: 10.15372/PMTF202415614
2. Berdov R.D., Anikin A.V., Volkov N.N., Volkova L.I., Gurina I.N., Tsatsuev S.M. Long-run testing of model nozzle extensions made of a carbon-carbon composite material in a liquid-propellant rocket engine operating on hydrogen and oxygen // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2019. – Vol. 60, N 1. – P. 80-86.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА С ПАРНОЙ СПИРАЛЬНО-ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРОЙ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ

Панкратов Е.В.^{1*}

1) Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
Архангельск, Россия

[*e.pankratov@narfu.ru](mailto:e.pankratov@narfu.ru)

В работе представлено исследование особенностей теплообмена при организации закрученного потока с парной спирально-вихревой структурой в кольцевом канале. Выявление особенностей организации закрученного потока в кольцевом канале позволят выделить основные механизмы интенсификации теплообмена [1]. Кольцевые каналы широко применяются в теплообменных устройствах, однако их использование для обогрева лопастей ветрогенераторов горячим воздухом с целью антиобледенительной защиты изучено недостаточно. [2].

Проведено экспериментальные исследования и численное моделирование закрученного потока в кольцевом канале с аксиально-лопаточным завихрителем. Стоит отметить, что при определенных условиях в зазоре кольцевого канала при начальной закрутке потока и неподвижных поверхностях кольцевого канала могут формироваться спирально-вихревые структуры с чередующимся левым и правым направлением вращения как показано на рис. 1.

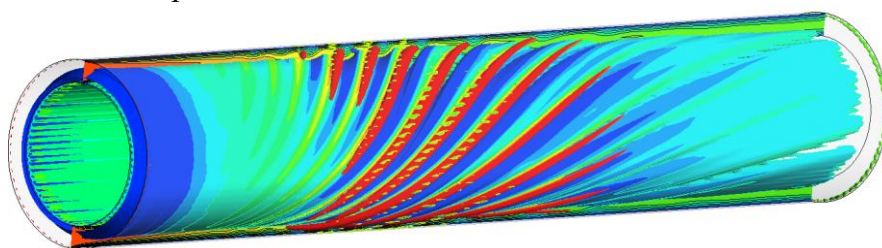


Рис. 1. Распределение W и λ_2 -критерия при $Re_z=1629$, $\varphi=75^\circ$

Для анализа гидродинамической неустойчивости потока был использован безразмерный критерий:

$$\frac{\rho w_\varphi^2 D_z}{\mu w_z} = \frac{\rho w_z D_z}{\mu} \cdot \frac{w_\varphi^2}{w_z^2} = Re_z \cdot S^2 \quad (1)$$

Проведённое исследование показало влияние локальной закрутки потока на формирование парных спирально-вихревых структур в кольцевом канале с неподвижными стенками, что отличает его от классических работ, посвящённых системам с вращающимися поверхностями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007

Литература

1. Pankratov E.V. Formation of the Secondary Vortices in an Annular Channel with Immovable Surfaces in the Case of Swirling of Fluid Flow in it / E.V. Pankratov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2025. – Vol. 98. – № 1.
2. A review of integrating ice detection and mitigation for wind turbine blades / E. Madi [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Vol. 103. – P. 269-281.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ЩЕЛОЧНОГО РАСТВОРА В ПОПЕРЕЧНОМ ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рахимов Р.Ф.^{1*}, Беляев И.А.¹, Пятницкая Н.Ю.¹

1) Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^{*}RakhimRF@ya.ru

В последнее время активно обсуждаются вопросы по использованию альтернативных теплоносителей в термоядерной энергетике. Опыты по исследованию жидких металлов в условиях с магнитным полем, начавшиеся еще в прошлом веке, сформировали определенное представление о течении в трубах и каналах, а также выявили существенный недостаток использования жидкометаллической (ЖМ) технологии: значительное увеличение гидравлического сопротивления под влиянием сильных магнитных полей. В последнее время для уменьшения перепада давления рассматриваются альтернативные теплоносители – жидкие соли [1], которые по свойствам имеют более низкую электропроводность и, соответственно, меньшее влияние магнитного поля по сравнению с ЖМ при одинаковой величине магнитной индукции. К тому же использование эвтектического состава $(\text{LiF})_2(\text{BeF}_2)$ позволит использовать гибридную технологию [1], в которой есть возможность нарабатывать третий из лития-7.

В работе [2] для изучения гидродинамики расплавов солей рассматривается имитатор – 30% водный раствор гидроксида калия. Согласно работе [3], в которой приведены результаты прямого численного моделирования для рассматриваемого щелочного раствора, существенное влияние на поток возникает при величине числа Гартмана $\text{Ha}=50$. Поэтому в данной работе приводятся результаты по исследованию водного раствора гидроксида калия с максимально возможными повышенными параметрами влияния магнитного поля на поток в солевом контуре ОИВТ РАН – МЭИ РК-3.

Для реализации поставленной задачи концентрация водного раствора была снижена до 20%, что позволило при одинаковых условиях эксперимента, описанных в [2], достичь максимально возможное число Гартмана. Далее увеличен диаметр трубы и поднята среднемассовая температура до 90°C , что в итоге позволило достичь $\text{Ha}=40$ ($B=1.77\text{ Т}$) в поперечном магнитном поле. Исследование проводилось на стабилизированном участке с помощью зонда продольного типа для получения температурных пульсаций по всему сечению трубы.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00269-25-00).

Литература

1. Ihli T. et al. Review of blanket designs for advanced fusion reactors // Fusion Engineering and Design. – 2008. – Т. 83. – №. 7-9. – С. 912-919.
2. Belyaev I. A. et al. Experimental study of molten salt mixed convection in a pipe affected by transverse magnetic field // Magnetohydrodynamics (0024-998X). – 2019. – Т. 55.
3. Belavina, E. A. et al. Model research of mixed convection in molten salts flow with influence of different forces // International Heat Transfer Conference Digital Library. – Begel House Inc., – 2023. – No.1. – p. 80-87.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ СТРУИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИЗИЧЕСКИ-ИНФОРМИРОВАННОЙ НЕЙРОСЕТИ

Руденко Ю.К.¹, Винниченко Н.А.¹, Пуштаев А.В.¹, Плаксина Ю.Ю.¹, Уваров А.В.¹

1) *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

**rudenkoyk@gmail.com*

Для описания турбулентных течений в инженерной практике используются различные полуэмпирические модели турбулентности. При этом модели, верифицированные для разных течений, могут давать существенно разные результаты. Экспериментальные измерения распределений кинетической энергии турбулентности k и, особенно, скорости диссипации ε с помощью PIV (Particle Image Velocimetry) характеризуются высокой погрешностью, что приводит к большой неточности определения турбулентной вязкости. Кроме того, для PIV требуется засев течения частицами, при исследовании быстрых течений необходимы скоростные камеры.

В данной работе предлагается новый метод ассимиляции данных для турбулентного течения, продемонстрированный на примере осесимметричной квазистационарной струи горячего воздуха. Подставляя среднее поле температуры, бесконтактно измеренное теньвым фоновым методом, в систему уравнений Навье-Стокса и считая турбулентное число Прандтля постоянным, можно найти поля остальных величин. В работе [1] описан метод восстановления с прямой подстановкой поля температуры в уравнения и последующим численным решением относительно полей скорости, давления, турбулентных вязкости и теплопроводности. Этот подход имеет ограничения, связанные с шумом исходных экспериментальных данных и вырождением уравнения энергии в областях с постоянной температурой. В данной работе предложен метод восстановления с применением физически-информированной нейросети (PINN [2]), которая ищет решение, приближенно удовлетворяющее уравнениям гидродинамики и мало отклоняющееся от имеющихся экспериментальных данных. Результаты получены для свободной [3] и импактной струй горячего воздуха. Восстановленные данные показывают хорошее согласие с численными расчетами. Наблюдающиеся расхождения в полях турбулентных характеристик имеют тот же порядок величины, что и между численными решениями, полученными с использованием различных моделей турбулентности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-19-00591, <https://rscf.ru/project/23-19-00591/>). Работа Ю.К. Руденко также была поддержана Фондом развития теоретической физики и математики “Базис” (грант № 22-2-2-5-1).

Литература

1. Rudenko Y.K., Vinnichenko N.A., Pushtaev A.V., Plaksina Y.Y., Uvarov A.V. Reconstruction of turbulent flow from temperature field measured using background oriented schlieren // Int. J. Thermofluids. – 2024. – V. 23, 100744.
2. 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. – V. 378, pp. 686–707.
3. Rudenko Yu.K., Vinnichenko N.A., Plaksina Yu.Yu., Uvarova I.F., Ganichev A.A., Uvarov A.V. Complete characterization of axisymmetric turbulent jet using Background Oriented Schlieren and Physics-Informed Neural Network // Heat Transfer Res. – 2025. – V. 56, №5, pp. 17-35.

УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ВОДОРОДА В НАКЛОННОМ ПОДОГРЕВАЕМОМ СЛОЕ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ

Сагитов Р.В.^{1*}

1) Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

^{*}sagitovrv@mail.ru

Данная работа посвящена исследованию устойчивости течения водорода, ограниченного двумя параллельными твердыми плоскостями, наклоненными вокруг горизонтальной оси, вдоль которой задан перепад давления. В приближении Буссинеска найдено стационарное решение уравнений конвекции, соответствующее комбинации плоского течения Пуазейля [1], имеющего параболический профиль, и течения с кубическим профилем [1]:

$$T_0 = -Gr x, p_0 = p^{(0)} - 2Re z - \frac{x^2}{2} Gr \cos \alpha, v_{y0} = \frac{x - x^3}{6} Gr \sin \alpha, v_{z0} = (1 - x^2) Re. \quad (1)$$

Построены зависимости критических чисел Грасгофа малых возмущений от числа Рейнольдса при разных углах наклона слоя (рис. 1). При числах Релея меньших наименьшего, при котором происходит дестабилизация плоского течения Пуазейля при одинаковых температурах ограничивающих плоскостей [1], при превышении числом Грасгофа критического значения основное течение становится неустойчивым. В противном случае, если более нагретая граница расположена снизу, оно неустойчиво при любом числе Грасгофа. При этом если верхняя граница обладает более высокой температурой, то при достаточно малых числах Релея существует интервал чисел Грасгофа, где основное течение устойчиво, и верхняя и нижняя границы которого с увеличением угла наклона слоя поднимаются. Увеличение в определённых пределах температуры верхней границы оказывает стабилизирующее действие на течение.

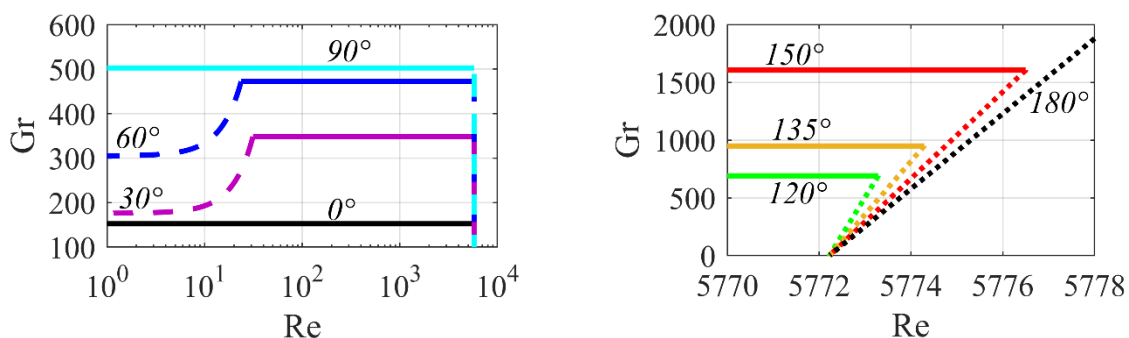


Рис. 1. Критические числа Грасгофа в зависимости от числа Релея при разных углах наклона слоя.

Исследование проведено по государственному заданию, проект FSNM-2023-0004.

Литература

1. Дразин Ф. Введение в теорию гидродинамической устойчивости. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 288 с.
2. Гершуни Г.З, Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. — М.: Наука, 1989. 320 с.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА С ПОМОЩЬЮ СТЕРЖНЕЙ-ТУРБУЛИЗАТОРОВ

Сероштанов В.В.^{*}, Князев С.А., Гусаков А.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

^{*}serosht_vv@spbstu.ru

Представлено исследование теплообмена на поверхности одиночного кругового цилиндра со стержнями-турбулизаторами при поперечном обтекании. Опыты проводились на полой, обогреваемом насыщенным водяным паром цилиндре диаметром $D = 66$ мм при числе Рейнольдса $Re = 9,6 \cdot 10^3$. На поверхности цилиндра или вблизи нее располагались два стержня-турбулизатора, симметрично разнесенные относительно лобовой образующей на угол ψ . В работе варьировались диаметр стержней $d = 1,2 \dots 3,6$ мм; угол ψ – в диапазоне от 15 до 90°; зазор между стержнями-турбулизаторами и поверхностью цилиндра $\delta = 0 \dots 1,2$ мм.

Измерения местной плотности теплового потока проводились градиентным датчиком теплового потока из монокристаллического висмута [1], установленным на поверхности цилиндра. Цилиндр мог проворачиваться вокруг оси на угол ϕ , что позволило получить распределение местного числа Нуссельта для различной геометрии системы (рис. 1).

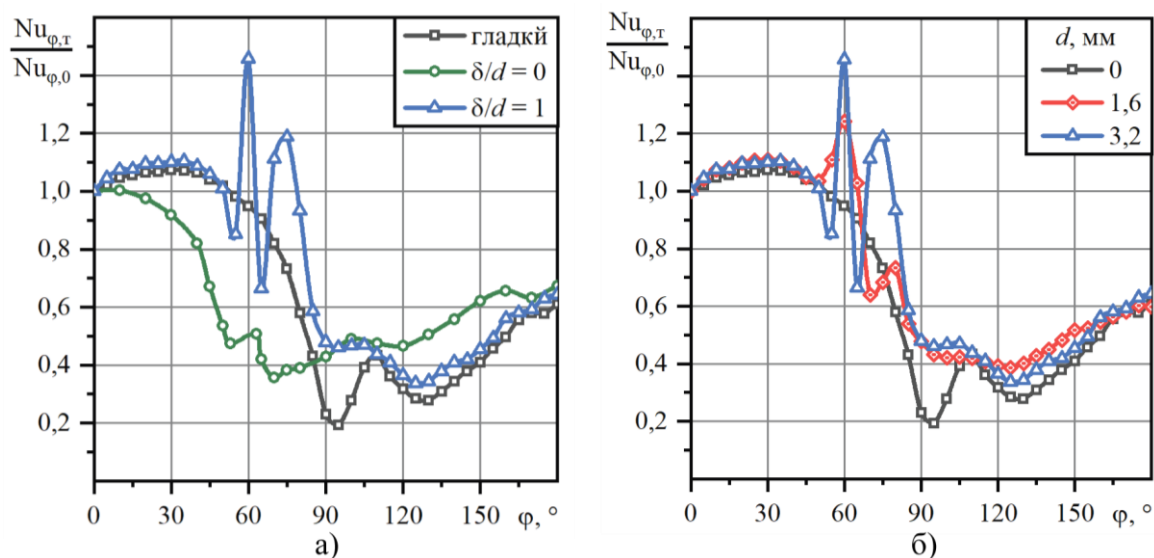


Рис. 1. Местное число Нуссельта на поверхности цилиндра при $\psi = 60^\circ$:
а – влияние зазора ($d = 3,6$ мм); б – влияние диаметра стержней ($\delta = d$)

Показано влияние угла установки, толщины стержней-турбулизаторов и зазора между ними и цилиндром. В исследуемом режиме удалось повысить средний по поверхности коэффициент теплоотдачи на 13% в сравнении с гладким цилиндром.

Литература

1. С. А. Князев, М. Д. Селезнева, А. А. Ключ [и др.]. Исследование теплообмена в одиночной овально-траншейной лунке на пластине при ее различной ориентации по потоку // Неделя науки ФизМех: Сборник материалов Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 01–05 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – С. 386-389

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛАМИНАРНОГО КОНУСНОГО ПЛАМЕНИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ КРОМКИ СОПЛА

Сластная Д.А.^{1*}, Хребтов М.Ю.^{1,2}

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[*da.slastnaya@gmail.com](mailto:da.slastnaya@gmail.com)

Возникновение нестационарного горения является серьезной проблемой при проектировании и эксплуатации многих энергетических систем, таких как газовые турбины, авиационные и ракетные двигатели. Наличие возмущений в пламени приводит к снижению производительности, ограничению условий эксплуатации и повышенному выбросу загрязняющих веществ [1]. Исследование условий перехода к нестационарному горению позволит оптимизировать процессы горения для обеспечения более эффективного и экологически чистого сгорания топлива. В работе представлено численное исследование возникновения возмущений во фронте ламинарного предварительно перемешанного пламени в форме конуса.

Вычисления проводятся на основе открытого вычислительного кода OpenFOAM, где для разрешения гидродинамики используется метод конечных объемов в сжимаемой постановке. Моделирование реагирующей струи осуществляется путем решения системы уравнений: неразрывности, баланса импульса, баланса массы отдельных компонент смеси и баланса энергии. Химическая кинетика определяется с помощью расчетного пакета laminarSMOKE [2], позволяющего учитывать детальные механизмы реакций. Данные об элементарных реакциях задаются отдельным файлом в формате CHEMKIN. Используемый кинетический механизм включает 53 компонента смеси и 324 реакции (GRI-MECH 3.0). Задача решается в осесимметричной нестационарной постановке с учетом сил плавучести.

В рамках исследования решение задач гидродинамики методом прямого численного моделирования и химической кинетики с использованием детального кинетического механизма дополнено решением задачи сопряженного теплообмена между стенками сопла и пламенем. В ходе исследования определено влияние теплового состояния кромки сопла на динамику пламени, изучены причины возникновения неустойчивости.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

Литература

1. Lieuwen T. C. Unsteady combustor physics // Cambridge University Press, 2021.
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.

АНАЛИЗ ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ЯЧЕЙКЕ БЕНАРА МЕТОДОМ ЛАГРАНЖЕВОГО ОТСЛЕЖИВАНИЯ ЧАСТИЦ

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

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

^{*}m.sorokin1204@gmail.com

Анемометрия по изображениям частиц (англ.: particle image velocimetry PIV) [1] успешно применяется для диагностики потоков на протяжении длительного времени. Однако для исследования динамики сложных трехмерных течений этой информации недостаточно. Примером таких течений являются конвективные потоки, структура которых, зачастую, имеет сложную трехмерную форму [2]. Таким образом, для более полного понимания динамики и структуры ряда течений необходимо применять методы, позволяющие регистрировать распределения измеряемых величин в объеме. Одним из таких методов является метод лагранжового отслеживания частиц (англ.: Lagrangian Particle Tracking (LPT)), наиболее известной реализацией которого является метод Shake-The-Box (STB) [3].

В рамках второго LPT вызова (2nd Lagrangian Particle Tracking and Data Assimilation Challenges) методом лагранжового отслеживания частиц был проведен анализ данных, представленных организаторами как один из этапов соревнования. В данном этапе содержались данные экспериментального исследования трехмерной структуры течения в ячейке Рэлея-Бенара [4], представляющие собой изображения гелиевых мыльных пузырей, полученные с помощью четырех 5.5 мегапиксельных КМОП камер.

В результате проведенного анализа данных были получены трёхмерные координаты отслеживаемых частиц, их траектории, скорости и ускорения для различных концентраций 0.01, 0.04 и 0.07 ppp (particles per pixel).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 19-79-30075, <https://rscf.ru/project/19-79-30075/>).

Литература

1. Adrian R. J., Westerweel J. Particle image velocimetry. – Cambridge university press, 2011.
2. Sakakibara J., Adrian R. J. Whole field measurement of temperature in water using two-color laser induced fluorescence //Experiments in Fluids. – 1999. – Т. 26. – №. 1-2. – С. 7-15.
3. Schanz D., Gesemann S., Schröder A. Shake-The-Box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities //Experiments in fluids. – 2016. – Т. 57. – С. 1-27.
4. Weiss S. et al. On Lagrangian properties of turbulent Rayleigh–Bénard convection //Journal of Fluid Mechanics. – 2024. – Т. 999. – С. A90.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ГАЗОДИНАМИКИ РЕШЕТОК ТУРБОМАШИН

Тищенко В.А.¹, Попов В.В.¹, Гаврилов И.Ю.¹, Грибин В.Г.¹, Тищенко А.А.¹,
Бердюгин К.А.¹, Соколов Д.Г.¹, Смирнов А.О.^{1*}

1) *Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, 111250, Москва, Россия*

**SmirnovAOI@mpei.ru*

В работе рассматривается вопрос применения нейронных сетей в области газодинамики решеток энергетических турбомашин. Основным достоинством моделей, построенных на основе глубокого машинного обучения, является возможность выявления сложных взаимосвязей между входными данными и целевыми параметрами, значения которых необходимо определить. Благодаря их обобщающей способности, в рамках одной нейронной сети можно реализовать расчет аэродинамических характеристик элементов проточных частей турбомашин в широком диапазоне их геометрических параметров и режимов работы. Эти особенности позволяют интегрировать подобные модели в процессы проектирования турбомашин, для которых характерен итерационный подход. В работе представлены результаты разработки и применения нейронных сетей в ряде направлений задач газодинамики в турбомашинах.

Разработана и описана архитектура моделей глубоко машинного обучения, позволяющих определять профильные потери кинетической энергии в сопловых и рабочих решетках турбомашин. Проведена проверка возможности унификации модели для широкого спектра режимных параметров — разработанная на данных по дозвуковым режимам нейронная сеть была также обучена на сверхзвуковых режимах, что позволило учесть влияние волновой структуры потока на энергетические потери. Валидация созданных моделей показала среднеквадратичную погрешность 1% для сопловых решеток и 2% для рабочих.

Проведено исследование применения глубокого машинного обучения для анализа характера движения капель в межлопаточных каналах турбинных решеток. Разработанный алгоритм, применяющий нейронную сеть, оказался в разы быстрее традиционных методов моделирования [1]. Данный подход позволяет эффективно прогнозировать поведение капель в турбинных решетках — предсказывать области оседания частиц жидкой фазы на поверхностях сопловых лопаток, рассчитывать характеристики жидкой фазы на выходе из сопловой решетки. Эти данные необходимы для проектирования высокоэффективных систем борьбы с крупной эрозионно-опасной влагой в последних ступенях конденсационных паровых турбин. Среднеквадратичная погрешность определения различных параметров капель лежит в диапазоне 1-5%.

На основе проведенных исследований, разработаны концепции применения нейронных сетей в различных направлениях расчета проточных частей паровых и газовых турбин.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-19-00445, <https://rscf.ru/project/23-19-00445/>).

Литература

1. Тищенко В.А., Алексеев Р.А. Численное моделирование процессов образования и движения водяной пленки и эрозионно-опасных капель в проточных частях паровых турбин // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 72–81.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ ВБЛИЗИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Шенягин Е.М.¹, Беляев И.А.^{1*}, Лучинкин Н.А.¹, Синяев Д.А.¹

1) *Объединенный институт высоких температур РАН*

* Bia@ihed.ras.ru

Жидкие металлы обладают рядом особенностей, которые делают их, с одной стороны, привлекательной рабочей средой (теплофизические свойства, отсутствие замедления нейтронов, высокая температура кипения и низкое давление насыщенных паров), а с другой стороны, создают трудности в их использовании (высокая температура плавления, химическая и коррозионная активность по отношению к воздуху и конструкционным материалам). Кроме того, использование жидких металлов в сильных магнитных полях многократно увеличивает затраты на перекачку, а также приводит к возникновению сложных эффектов при взаимодействии магнитного поля с вихревыми структурами, генерируемыми силами плавучести вблизи зон нагрева.

Отсутствие надежной экспериментальной базы (особенно для свободной и смешанной конвекции жидких металлов в магнитном поле) значительно затрудняет численное моделирование проектируемых систем ядерных и термоядерных установок и делает невозможным создание и отладку новых численных моделей. Экспериментальные исследования на реальных теплоносителях, таких как натрий, свинец, эвтектические сплавы свинца и лития, осложняются их спецификой, а также инженерными и финансовыми трудностями при создании и эксплуатации экспериментальных установок.

Для воссоздания условий, близких к реакторам с использованием жидких металлов, была создана экспериментальная установка для изучения гидродинамики и теплообмена жидких металлов под воздействием поперечного магнитного поля.

В данной работе представлены результаты влияния поперечного магнитного поля на теплообмен и структуру свободоконвективных потоков, генерируемых цилиндрическим нагревателем малого диаметра (макет тепловыделяющего элемента) в замкнутом объеме ртути. Рабочий участок состоял из вертикального квадратного канала высотой 650 мм, с поперечным сечением 56х56 мм, и цилиндрическим нагревателем, расположенным по центру. На внешних стенках канала с помощью водяного охлаждения обеспечивалось условие постоянной температуры стенки. Измерения проводились с помощью погружного микротермопарного зонда в диапазоне чисел Грасгофа $Gr = 9 \cdot 10^{14} - 7 \cdot 10^{15}$ ($q = 100-750$ Вт), чисел Гартмана $Na = 0 - 1135$ ($B = 0-1.6$ Тл). Для определения локального числа Грасгофа использовалась актуальная высота нагревателя, для определения Гартмана – половина поперечного размера канала вдоль магнитного поля. Также было проведено сравнительное экспериментальное исследование влияния различных диаметров цилиндрического нагревателя на структуру свободоконвективных потоков и проведена оценка коэффициентов теплоотдачи на поверхности нагревательного элемента.

В результате измерений было обнаружено значительное влияние поперечного магнитного поля на свободоконвективные потоки жидкого металла: наблюдалось почти полное подавление температурных флуктуаций в плоскости, параллельной магнитному полю, тогда как в перпендикулярной плоскости воздействие имеет сложную картину. Полученные зависимости для безразмерных коэффициентов теплообмена сравниваются с существующими эмпирическими закономерностями и расчетными данными.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПЛАСТИНЕ С НАКЛОННЫМИ К ПОТОКУ СЛОТАМИ

Яцких А.А.^{*1}, Лысенко В.И.¹, Смородский Б.В.¹, Юзенас А.Д.¹, Афанасьев Л.В.¹,
Семенов А.Н.¹

1) *Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,*
Новосибирск, Россия
*[*yatskikh@itam.nsc.ru](mailto:yatskikh@itam.nsc.ru)*

Турбулизация пограничного слоя при малом уровне возмущений набегающего потока связана с неустойчивостью течения. Одним из возможных способов влияния на устойчивость течения в пограничном слое является микропрофилирование поверхности, при которой изменение глобальной картины обтекания незначительно, тогда как течение внутри пограничного слоя модифицируется. В исследованиях при высоких скоростях потока в последнее время уделяется особое внимание возможности использования слотов (каналов малой глубины) на положение ламинарно-турбулентного перехода. При сверхзвуковых скоростях, когда доминирующую роль в переходе к турбулентности играют возмущения первой моды Мэка, в экспериментах на пластине с продольными слотами была обнаружена стабилизация роста естественных и контролируемых пульсаций пограничного слоя [1, 2]. Дальнейшие экспериментальные исследования при числе Маха $M=2$, связанные с изучением влияния пространственной ориентации слотов на рост возмущений пограничного слоя показали, что при расположении слотов на пластине под углом к набегающему потоку нарастание пульсаций больше, по сравнению со случаями продольных слотов и гладкой модели.

В данной работе проводится численное моделирование стационарного течения и развития возмущений в пограничном слое на плоской пластине со слотами, ориентированными под различными углами к внешнему потоку в постановке, близкой к экспериментам. Представляются данные численного моделирования развития локализованных во времени возмущений, определяются волновые характеристики развития пульсаций. Получено, что в случае наклонных к потоку слотов на поверхности пластины в пограничном слое возникает значительное поперечное течение. Анализ развития возмущения показал, что рост наклонных возмущений значительно усиливается, по сравнению со случаем гладкой пластины и пластины с продольными слотами. Это может быть объяснено тем, что поперечное течение в пограничном слое приводит к дестабилизации пограничного слоя, что подтверждается расчетами в рамках линейной теории гидродинамической неустойчивости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-79-10167, <https://rscf.ru/project/23-79-10167/>). Работа выполнена на базе ЦКП «Механика» ИТПМ СО РАН. Численное моделирование проведено в программном комплексе FlowVision (ООО «ТЕСИС», <https://flowvision.ru/>).

Литература

1. Лысенко В.И., Смородский Б.В., Косинов А.Д., Яцких А.А. Влияние глубины слотов на стабилизацию сверхзвукового пограничного слоя // Теплофизика и аэромеханика (2024) **31**, №1, с. 77-85.
2. Лысенко В.И., Смородский Б.В., Косинов А.Д., Яцких А.А., Афанасьев Л.В. Стабилизация слотами контролируемых возмущений в сверхзвуковом пограничном слое // Теплофизика и аэромеханика (2024) **31**, №6, с. 1071-1076.

СЕКЦИЯ 2. ТЕПЛОМАССОБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА В МНОГОФАЗНЫХ СРЕДАХ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЁРДОГО ТЕЛА С УЧЁТОМ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ FLOWVISION

Аксенов А.А.¹, Сиренко А.Г.^{1*}

1) ООО «ТЕСИС», г. Москва

* sirenko@flowvision.ru

В настоящее время актуальны задачи сильного взаимодействия конструкции и жидкости (газа) (FSI— fluid-structure interaction), возникающие при проектировании новой техники. Это задачи аэроупругости, деформаций при термическом воздействии на конструкции и так далее. Для решения подобного рода задач применяется подход расщепления уравнений. При таком подходе уравнения гидродинамики решаются в одних программных комплексах (традиционно методами конечных объемов), а уравнения напряженно-деформированного состояния (НДС) – в других, традиционно основанных на методе конечных элементов. Однако, такой подход в решении задач сильного FSI имеет ряд существенных проблем, например, появляющихся при обмене данными между комплексами. В связи с этим возникает интерес к решению уравнений деформации твёрдого тела на конечно-объёмной расчётной сетке для реализации монолитного подхода к задачам FSI.

В работе предложена схема интегрирования уравнений равновесия деформируемого твёрдого тела с использованием конечно-объёмного подхода. Рассматривается модель линейной упругости для малых деформаций с учётом теплового расширения материала. Описанная схема интегрирована в программный комплекс FlowVision.

Валидация результатов проведена на примере моделирования обтекания твёрдого тела потоком горячего газа в сравнении с аналогичным совместным расчётом (гидродинамика FlowVision + расчёт напряжений средствами Abaqus). Получено хорошее согласование распределения деформаций и напряжений.

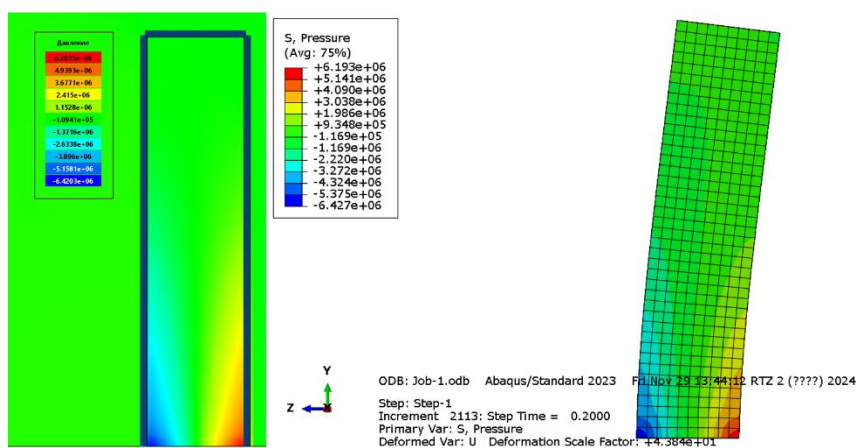


Рис. 1. Распределение давления в твёрдом теле, обтекаемом потоком газа в канале. Слева — моделирование во FlowVision, справа — совместный расчёт FlowVision + Abaqus (деформация тела отображается с коэффициентом масштабирования)

Литература

1. Cardiff, P., Demirdžić, I. Thirty Years of the Finite Volume Method for Solid Mechanics. // *Arch Computat Methods Eng* 28, 3721–3780 (2021).

ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ ПРИ АДРЕСНОЙ ДОСТАВКЕ В ДЫХАТЕЛЬНЫЕ ПУТИ

Антонов Д.В., Керимбекова С.А.*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

**susanna21@tpu.ru*

Успешность ингаляционной терапии зависит не только от выбора лекарственного препарата, но и от способа и устройства его адресной доставки в дыхательные пути. Для оценки эффективности доставки лекарственного препарата в дыхательные пути с помощью ингаляционных устройств наиболее распространённой характеристикой является депозиция (т.е. отложение) препарата в дыхательных путях, которая по экспериментальным данным находится в пределах от 2 до 60% [1]. Для того, чтобы потоки аэрозолей, доставляемые в дыхательные пути, могли раскрыть весь свой потенциал, необходимо не только правильно подобрать лекарственный препарат или их комбинацию, его форму и устройство доставки, но и понимать физику распыления лекарственного препарата с помощью дозирующих устройств для доставки препарата в определенные зоны дыхательных путей. Именно оптимизация всех параметров необходима для успешной разработки эффективных и безопасных ингаляционных методов лечения. Для анализа гидродинамических особенностей потоков аэрозолей для адресной доставки лекарственных препаратов в дыхательные пути изучены следующие устройства доставки: дозирующий аэрозольный ингалятор под давлением (pMDI), небулайзер Omron CompAir NE-C20 Basic (Omron Healthcare Inc), устройство по типу мягкого тумана (Респимат). Выбор дозирующего аэрозольного устройства обусловлен широкой распространенностью, простотой использования, применением при различных заболеваниях легких, в первую очередь, при бронхиальной астме и хронической обструктивной болезни легких. В качестве лекарственного препарата во всех экспериментах использован Сальбутамол.

Комбинация нескольких оптических методик (теневой съемки и лазерной доплеровской анемометрии) позволила определить распределения капель по размерам и скоростям, оценить интегральные характеристики аэрозольного потока лекарственного препарата. В частности, максимальные углы раскрытия и протяженности аэрозольного потока. Анализ вышеописанных данных проводился при различных начальных положениях распылительного устройства: горизонтально, вертикально, под углом 45°. Исследовано также взаимодействие аэрозольного потока при столкновении с модельной преградой. В качестве преграды использована гидрофильная пластина из алюминиево-магниевого сплава АМг6 толщиной ~4 мм и диаметром ~50 мм. Краевой угол смачивания данной пластины составлял ~11°.

Экспериментальные данные о распределении капель потока лекарственного препарата по размерам и скоростям движения, а также под различными углами расположения устройства доставки является основой для понимания физики процесса распыления и прогнозирования дальнейшей целевой доставки лекарственных препаратов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 24-45-00012, <https://rscf.ru/project/24-45-00012/>).

Литература

1. L.J. Liang W, Pan HW, Vllasaliu D, Pulmonary Delivery of Biological Drugs, Pharmaceutics. 12 (2020) 1025.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ В ВОСХОДЯЩЕМ НАГРЕТОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Архипов В.А., Басалаев С.А., Матвиенко О.В., Перфильева К.Г.* , Романдин В.И.

Томский государственный университет, Томск, Россия

**k.g.perfiljeva@yandex.ru*

Исследование закономерностей испарения капель играет важную роль в ряде прикладных задач, связанных с экологией, сельским хозяйством, энергетикой и др. [1]. В частности, в процессе авиационного пожаротушения хладагент, сброшенный из водосливного устройства, осаждается в виде кластера капель в восходящем конвективном потоке воздуха, который образуется в очаге пожара. Данный эффект оказывает значительное влияние на закономерности осаждения и испарения капель. Взаимодействие капель с нагретым потоком воздуха приводит к неоднородности температурных и скоростных полей. В этом случае использование стандартной кривой сопротивления может привести к погрешностям при расчете скорости движения капель в высокотемпературной среде. Для получения адекватных зависимостей коэффициента сопротивления в условиях разности температур капель и среды необходимо детальное исследование данного процесса.

В настоящей работе представлены результаты экспериментально-теоретического исследования динамики и испарения капель в процессе осаждения в полном цилиндрическом нагревателе с учетом скорости встречного нагретого конвективного потока воздуха.

Экспериментальные исследования скорости испарения капель проводилось на установке, состоящей из полого цилиндрического нагревателя, системы подачи жидкости и системы визуализации (скоростная видеокамера). В ходе эксперимента проводились измерения температуры по высоте нагревателя при различных уровнях мощности обогревающего устройства, скорости конвективного потока воздуха на выходе из нагревателя при различных температурах и взвешивание капель до и после прохождения через нагреватель.

На основе полученных экспериментальных данных разработана физико-математическая модель свободной конвекции внутри открытого цилиндрического нагревателя и осаждения капель в восходящем конвективном потоке. Данная модель учитывает не только динамические особенности движения капель в потоке, но и процессы теплообмена и испарения капель.

Проанализировано влияние размера капель и величины мощности подводимой к стенкам тепловой энергии на температуру капель и потерю массы за счет испарения. Установлено, что уменьшение диаметра капель приводит к повышению их температуры. Для достаточно мелких капель происходит их мгновенное испарение. Увеличение подводимой энергии также усиливает интенсивность испарения.

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

Литература

1. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы. Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2016.

ВЛИЯНИЯ ПЕННОГО ПОКРОВА НА ОБМЕН ИМПУЛЬСОМ И ТЕПЛОМ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НАД ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Вдовин М.И.^{1*}, Сергеев Д.А.¹

1) Институт прикладной физики им А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

*maximvdovi@ipfran.ru

Настоящая работа посвящена исследованию влияния пенного покрова на обмен импульсом и теплом в широком диапазоне условий ветро-волновой обстановки в рамках лабораторного моделирования на канале ИПФ РАН. Для разделения вклада от волнения и собственно пенного покрова в турбулентные потоки дополнительно использовалась специальная система искусственной пеногенерации (см. [1]), которая позволяла варьировать его характеристики при фиксированной скорости ветра. Исследования выполнены в широком диапазоне параметров воздушного потока: эквивалентная скорость ветра U_{10} на высоте 10 м до 30 м/с при пересчете на натурные условия. Для получения данных о параметрах пограничного слоя над водной поверхностью выполнялись измерения профилей средней скорости и температуры. Параллельно с ними выполнялись измерения параметров пенного покрова теневым методом визуализации: съемкой вида сверху с подсветкой из-под воды. Измерения характеристик площади поверхности занятой пенным покровом продемонстрировали, что эффект дополнительной пеногенерации проявляется до скоростей U_{10} порядка 25 м/с. При более высоких скоростях ветра начинается регулярное обрушение волн и параметры площади поверхности покрова естественной пеногенерации становятся близкими к искусственной. Восстановленные по профилям скорости и температуры коэффициенты обмена импульсом и теплом продемонстрировали, что наличие дополнительного пенного покрова приводит к их увеличению (см. рис. 1). Эффект увеличения аэродинамического сопротивления может быть связан с дополнительной шероховатостью от пены, а коэффициента теплообмена с увеличением площади межфазного контакта.

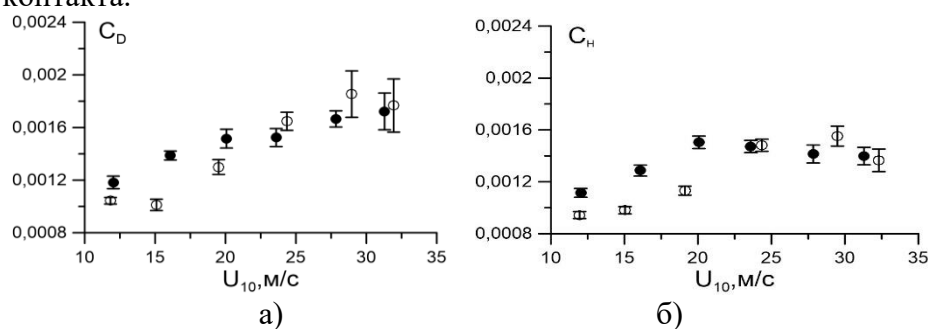


Рис. 1. Зависимости от скорости ветра U_{10} а) коэффициента обмена импульсом, б) коэффициента обмена теплом (открытые символы – без пены, сплошные – с дополнительной пеной).

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта РНФ № 23-77-10060.

Литература

1. Troitskaya Y., Sergeev D., Kandaurov A., Vdovin M., and Zilitinkevich S. The Effect of Foam on Waves and the Aerodynamic Roughness of the Water Surface at High Winds. Journal of Physical Oceanography – 2019 – 49 – P.959–981.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ НА РАЗБРЫЗГИВАНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СОУДАРЕНИИ

Верходанов Д.А.^{1*}, Вожаков И.С.², Пискунов М.В.^{1,2}, Хомутов Н.А.¹

1) *Томский политехнический университет, Томск, Россия*

2) *Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*

**dav28@tpu.ru*

Изучение высокоскоростного взаимодействия капель с супергидрофобными поверхностями при числах Вебера (We) более 1000 представляет значительный интерес для авиации и энергетики. Однако влияние микротекстуры на динамику соударения при высоких числах We остается малоисследованным. В данной работе методом высокоскоростной визуализации со скоростью съемки до 66000 кадр/с исследовано влияние шероховатости и смачиваемости покрытий на процесс коронообразного разбрызгивания капель воды во время их нормального соударения с начальными скоростями до 20 м/с ($We \approx 2800$). Эксперименты проводились на аэрогидродинамическом стенде с использованием четырех подложек из титана, поверхность которых предварительно подготавливалась, чтобы обеспечить шероховатость поверхностей соударения от 0,04 до 15,4 мкм и их краевой угол смачивания от 70° до 143° . Шероховатость поверхностей анализировалась методом интерференционной профилометрии, а смачиваемость характеризовалась с использованием анализатора формы капель Kruss DSA25. Результаты высокоскоростной съемки позволили зарегистрировать шесть режимов поведения капель воды при высокоскоростном соударении с поверхностями: растекание, быстрое разбрызгивание, не осесимметричное коронообразование, осесимметричное коронообразование, комплексный процесс коронообразования с полным и подавленным отскоком. В качестве основных определяемых характеристик рассмотрены продолжительность существования коронообразной структуры, угол её раскрытия и интегральные геометрические размеры. Отмечено, что режимы поведения в первую очередь определяются шероховатостью поверхности (R_a) и краевым углом смачивания. На полированных поверхностях с $R_a = 0,04$ мкм при числе Вебера $We = 500$ наблюдается режим растекания, который сменяется разбрызгиванием при увеличении We до 1700-2800. На поверхностях из титана с $R_a = 1,02$ мкм происходит не осесимметричное коронообразование во всем диапазоне скоростей соударения, в то время как микро-текстурированные поверхности с $R_a = 10-15$ мкм обеспечивают осесимметричное формирование короны с последующим её дроблением при значениях $We > 1500$. Анализ данных выявил экспоненциальную зависимость диаметра короны от We и краевого угла смачивания. Максимальное время существования короны зафиксировано при $We \approx 2100$ для микро-текстурированных поверхностей с $R_a = 10-15$ мкм. При этом скорость разлета фрагментов после разрушения короны снижается с увеличением угла раскрытия короны. Такие параметры для формирования осесимметричной и устойчивой короны как $R_a = 10-15$ мкм и краевой угол смачивания более 140° позволили обеспечить еще и наибольший диаметр раскрытия короны, демонстрируя высокую эффективность удаления жидкости с поверхности после соударения. Полученные результаты будут востребованы при проектировании водоотталкивающих покрытий с контролируемыми характеристиками смачиваемости и топологии поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-71-10081, <https://rscf.ru/project/23-71-10081/>)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ПЛОСКИХ МИКРОКАНАЛАХ

Дементьев Ю.А.^{1,2*}, Дегтярёв С.А.^{1,2}, Чиннов Е.А.^{1,2}

1) Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

2) Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*demyurij@inbox.ru

Перепад давления – важнейшая характеристика двухфазных течений, определяющая мощностные затраты на прокачку теплоносителя, стабильность и эффективность работы микроканальных систем. В условиях уменьшения размеров каналов до нескольких десятков микрон физические явления, связанные с межфазным взаимодействием, становятся более выраженными и существенно влияют на распределение давления, структуру потока и интенсивность теплообмена. Актуальным является создание точных моделей и корреляций для прогнозирования двухфазного перепада давления с учётом физических особенностей микромасштабных течений.

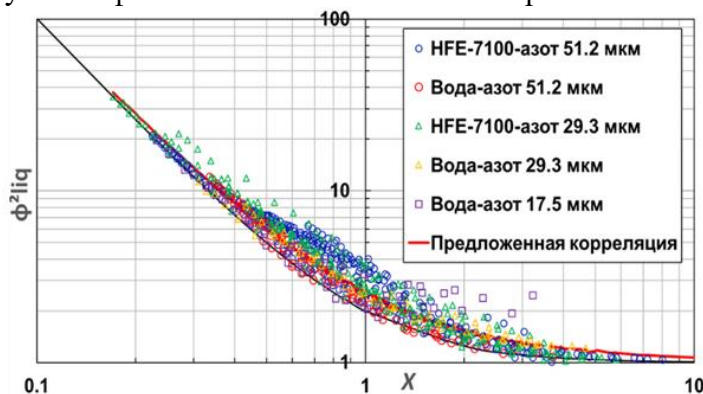


Рис.1. Предложенная корреляция для в плоских микроканалах 10-55 мкм.

В данной работе проведено экспериментальное исследование параметра межфазного взаимодействия Чизхолма для потоков HFE7100-азот, вода-азот. С использованием шпирен-визуализации выделены механизмы эволюции параметра Чизхолма при различных массовых скоростях газа и жидкости. На основании анализа параметра Чизхолма предложена модификация модели раздельного течения Локхарта-Мартинелли, где в качестве однофазного перепада давления по газу используется неявное выражение Choquette et al. [1]. Показано, что учет сжимаемости фаз в модифицированной модели даёт физически корректную интерпретацию параметра Чизхолма, включая только взаимодействие на трение, что согласуется с наблюдаемой картиной визуализации потоков. В рамках модифицированной модели предложена корреляция параметра межфазного взаимодействия (1), которая предсказывает двухфазный перепад давления на трение в исследуемой группе каналов с средним абсолютным отклонением равным 12.3% (Рис.1).

$$C = 0,0914 Ca_l^{0,303} We_{lo}^{-0,109} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0,8229} \quad (1)$$

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 25-29-00709, <https://rscf.ru/project/25-29-00709/>).

Литература

1. Choquette S. F. et al. Compressible fluid flow in micron sized channels. – American Society of Mechanical Engineering, New York, NY, 1996. – №. CONF-960815.

ИЗМЕРЕНИЕ МЕСТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Зайнуллина Э.Р.* , Митяков В.Ю. Сапожников С.З.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

*zajnullina_er@spbstu.ru

Оценено распределение местного коэффициента теплоотдачи (КТО) при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности горизонтальной трубы. Значения местных КТО рассчитаны по результатам прямых измерений местной плотности теплового потока с помощью градиентных датчиков теплового потока и температуре наружной поверхности трубы – термопарами типа L. Предлагаемый подход позволит количественно оценить неравномерность в распределении КТО по окружности горизонтальной трубы. Метод применим для различных режимов конденсации: при формировании единой конденсатной пленки и образовании отдельных капель, которые стекают с поверхности в виде отдельных ручьёв-ревулетов [1]. Основное преимущество подхода заключается в снижении неопределённости оценки местного КТО до 8 %.

Эксперименты выполнены в диапазоне расходов насыщенного водяного пара $G_{\text{пар}} = 1,1 \dots 2,8$ г/с и охлаждающей воды – $G_{\text{вода}} = 10 \dots 80$ мл/с. Указанные режимные параметры обеспечивают формирование на поверхности разных режимов конденсации, существенно отличающихся по значениям и характеру распределения КТО. В качестве примера на рис. 1 приведены распределения местных КТО при конденсации в диапазоне полярного угла $\varphi = 0 \dots 180^\circ$ с шагом в 15° .

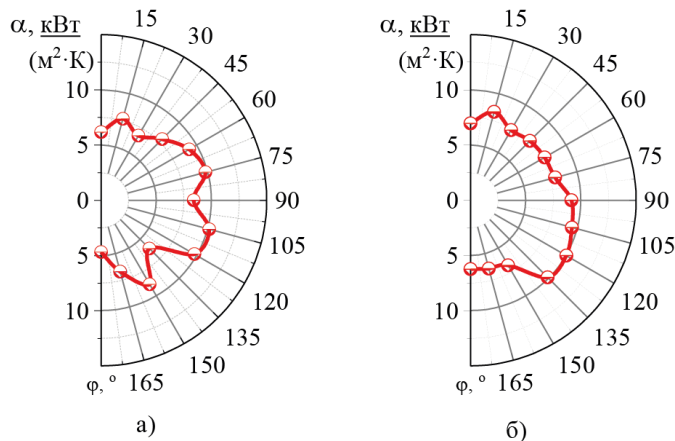


Рис. 1. Распределение местного КТО при конденсации насыщенного водяного пара с расходом 1,7 г/с (а) и 2,8 г/с (б) и расходом охлаждающей воды 80 мл/с

Неравномерность распределения КТО на рис. 1, а обусловлено низким расходом пара, при котором единая конденсатная пленка на поверхности горизонтальной трубы отсутствует. При увеличении расхода пара (рис. 1, б) снижение КТО происходит в нижней части горизонтальной трубы, связанное с формированием поддонной зоны.

Литература

1. Zainullina E.R., Mityakov V.Yu. Study of Drop-Stream Condensation by the Gradient Heatmetry // High Temperature 61(5):667-672, 2024.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ЖИДКОСТИ НА РАЗВИТИЕ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Здорников С.А.^{1*}, Исаенков С.В.¹, Черданцев А.В.¹

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

s.zdornikov@alumni.nsu.ru

Газожидкостные течения в горизонтальных трубах имеют широкий спектр применения: они реализуются в трубопроводах, конденсаторах, используются в химической и нефтегазовой промышленности.

Причинами подъёма жидкости по стенкам канала при переходе от стратифицированного к кольцевому режиму могут быть внутренние течения в газе, перенос капель и волновые процессы. Остаётся открытым вопрос, какой из этих механизмов является ключевым.

В данной работе изучено влияние свойств жидкости на трансформацию течения в области перехода стратифицированный-кольцевой режимы в горизонтальной трубе с внутренним диаметром 20 мм. Скорость газа изменяется от 10 м/с до 40 м/с, расход жидкости – от 3,8 мл/с до 25,1 мл/с. В качестве жидкой фазы выбраны вода, более вязкий водно-глицериновый раствор (45%) и водный раствор бутанола (5%) с меньшим поверхностным натяжением.

Методом количественной визуализации [1] получены изображения течения сбоку, по которым вычислена высота подъёма жидкости. Методом лазерно-индуцированной флуоресценции, основанном на яркости (BBLIF), [1] получены пространственно-временные записи толщины жидкой плёнки в трёх азимутальных положениях (0°, 90°, 180°). С помощью этих записей изучена волновая составляющая плёнки и измерены статистические характеристики толщины. Кроме того, с помощью дифференциального манометра измерен перепад давления.

В рамках визуального анализа изображений определены режимы потока и построены режимные карты для каждой жидкости. Обнаружено, что по сравнению с водой для потока с бутанолом переход к кольцевому течению происходит в условиях меньших скоростей газа и жидкости, а для потока с глицерином для формирования замкнутой плёнки, наоборот, требуются большие значения потоковых параметров.

По записям толщины плёнки определены волновые режимы в каждом положении и построены карты волновых режимов. Выявлено, что в потоке с бутанолом крупные волны практически не достигают верхней части трубы, а в потоке с глицерином в этом положении распространяются только мелкие волны. Косвенно подтверждено, что вторичные течения в газе являются необходимым условием в подъёме жидкости.

Проведено сравнение экспериментально измеренного осевого перепада давления с корреляцией для гладкой трубы и зависимостью Никурадзе. Отмечено, что учёт шероховатости в последней модели из упомянутых позволяет обобщить данные по перепаду давления на высокие расходы жидкости, но приводит к переоценке и недооценке перепада для потока с бутанолом и глицерином соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 19-79-30075, <https://rscf.ru/project/19-79-30075/>).

Литература

1. Cherdantsev, A.V. et al. Stratified-to-annular gas-liquid flow patterns transition in a horizontal pipe // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2022. – V. 132.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА ГРАНИЦЕ МАСЛО–ВОДА МЕТОДОМ ДВУХЦВЕТНОГО PLIF

Зотьева А.А.^{1*}, Ничик М. Ю.¹, Дулин В.М.^{1,2}

1) Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

2) Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

[*a.zoteva@g.nsu.ru](mailto:a.zoteva@g.nsu.ru)

В работе представлен эксперимент по изучению теплового взаимодействия на границе двух несмешивающихся жидкостей (воды и масла) методом двухцветной плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF). В качестве флуоресцентных красителей для воды и масла использовалась комбинация из родамина В, интенсивность флуоресценции которого зависит от температуры, и родамина 6G, который к температуре нечувствителен. Метод основан на калибровке интенсивности свечения красителей при различных температурах, что позволяет получить температурные поля в процессе эксперимента.

Перед началом эксперимента были проведены калибровки для каждой жидкости отдельно, был выбран второй порядок аппроксимации для калибровочных кривых [1]. После этого в воду комнатной температуры добавлялось предварительно нагретое до 70 °С масло. По ранее проведенным калибровкам были построены поля температур для визуализации процесса теплообмена между маслом и водой (Рис. 1).

В результате было с высокой точностью (RMS 5%) визуализировано остывание масла, но построение полей температур для нагрева воды корректно лишь частично, так как на Рис. 1а значительный вклад в общую интенсивность внесло отражение от межфазной границы воздух-вода.

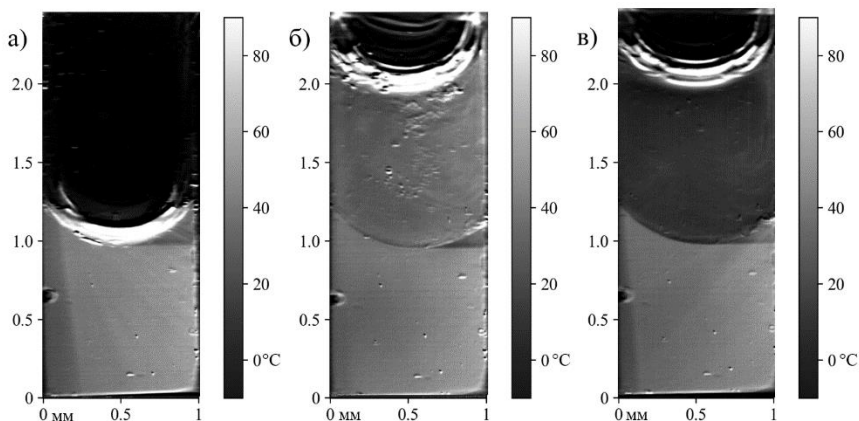


Рис. 1. Поля мгновенных температур для остывания воды и масла
а) начало эксперимента, б) вливание масла, в) спустя 40 секунд

Исследование выполнено за счет мегагранта (№ 075-15-2025-007, https://megagrant.ru/labs/lab_rus_1082740/).

Литература

1. Zhang Q. et al. The improvement and validation of laser induced fluorescence technology on temperature and concentration measurement //Annals of Nuclear Energy. – 2025. – Т. 211. – С. 110897.

СОУДАРЕНИЕ КАПЕЛЬ СУСПЕНЗИЙ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Исламова А.Г.^{1*}, Кропотова С.С.¹, Ткаченко П.А.¹, Стрижак П.А.¹

1) Томский политехнический университет, Томск, Россия

[*agi2@tpu.ru](mailto:agi2@tpu.ru)

Процессы столкновения капель встречаются в широкой группе промышленных приложений [1,2]: распылительная сушка, газопарокапельные системы, системы топливоподачи, очистки и фильтрации жидкости, пылеулавливания. Важным с научно-технической точки зрения является повышение эффективности перечисленных технологий за счет исследования характеристик процессов бинарного взаимодействия капель при варьировании большой группы факторов и параметров. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование характеристик взаимодействия капель суспензий при варьировании размеров и концентрации частиц (c_p) в жидкости. Схема и методика проведения экспериментальных исследований подробно описаны в [2].

Результаты экспериментальных исследований обобщены с использованием чисел Вебера (We) и Онезорге (Oh) (рис. 1), что позволяет одновременно учитывать силы поверхностного натяжения, инерции и вязкости, а также начальный размер и скорости движения капель. Определена граница между режимами «разрушение» и «коалесценция» на карте режимов взаимодействий капель. Установлено, что увеличение чисел Онезорге приводит к росту критического значения чисел Вебера, при котором начинается реализация режима разрушения для всех исследованных составов. Твёрдые частицы в каплях создают дополнительные центры возмущения, которые нарушают стабильность системы и способствуют ее более мелкому дроблению.

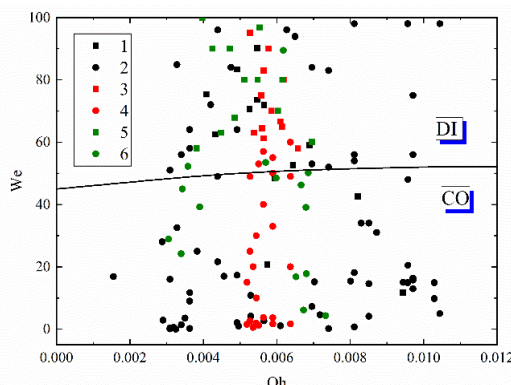


Рис. 1. Карта режимов взаимодействия капель жидкостей: 1, 2 – вода; 3, 4 – угольная суспензия ($c_p = 0,1 \%$); 5, 6 – угольная суспензия ($c_p = 0,5 \%$); 1, 3, 5 – разрушение (DI); 2, 4, 6 – коалесценция (CO).

Результаты исследований целесообразно использовать для прогнозирования исходов столкновений капель жидкостей в теплотехническом оборудовании.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-71-10040, <https://rscf.ru/project/21-71-03001/>).

Литература

1. Kuschel M., Sommerfeld M., Investigation of droplet collisions for solutions with different solids content // Exp. Fluids. – 2013. – Vol. 54.
2. Islamova A.G., Tkachenko P.P., Strizhak P.A. Effect of concentration and sizes of solid particles in slurry droplets on their collision behavior in gas // JAS. – 2025. – V. 185.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ И УГЛЕРОДИСТЫХ ЧАСТИЦ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВСТРЕЧНОГО ПОТОКА ВОЗДУХА

Исламова А.Г.¹, Кропотова С.С.^{1*}, Шуляев С.А.¹, Стрижак П.А.¹

1) Томский политехнический университет, Томск, Россия

*ssk22@tpu.ru

Процессы столкновения капель и частиц встречаются в широкой группе промышленных приложений: распылительная сушка, газопарокапельные системы, системы топливоподачи, очистки и фильтрации жидкости, пылеулавливания [1]. Особую важность с точки зрения влияния на окружающую среду и здоровье человека приобретает проблема очистки газовых и жидкостных потоков от дисперсных твердых (пылевых) частиц. Наиболее распространенным способом осаждения пыли в воздухе является пылеподавление, основанное на смачивании частиц каплями жидкости при соударении с образованием при этом системы «капля-частица», которая затем эффективно осаждается [2]. Актуальным является разработка принципиально новых технологий, а также совершенствование отдельных элементов использующихся пылеулавливающих устройств.

Проведены экспериментальные исследования процессов взаимодействия капель воды размерами 1–1.6 мм с твердыми частицами размерами 0.4–1.6 мм под воздействием встречного потока воздуха. В качестве твердых частиц для проведения исследований выбраны частицы угля и продукты его сгорания. Температура и скорость встречного потока варьировались в диапазонах от 50 до 250 °С и от 1 до 2 м/с соответственно. Зарегистрированы два режима взаимодействия капель и частиц – агломерация и дробление. Получены значения коэффициента сопротивления капель и частиц под воздействием воздушного потока. Показано, что при столкновении капель с продуктами сгорания угля критическое число Вебера We снижается в среднем на 51%, а коэффициент сопротивления увеличивается в среднем на 29% по сравнению со случаем столкновения капель с частицами угля. Установлена зависимость, связывающая коэффициент сопротивления и безразмерные критерии Рейнольдса, Фруда, Стокса и капиллярности. Составлен баланс энергий в зоне реализации различных режимов столкновения капель и частиц. Установлено, что при числах Вебера $We < 50$ и линейном параметре взаимодействия, равным 0, поверхностная энергия капель преобладает над кинетической и составляет более 50% от общей начальной энергии капли. Установлены диапазоны чисел Стокса, при которых происходит осаждение капли на частице. Получены аппроксимационные зависимости, описывающие процессы взаимодействия капель воды с твердыми частицами и позволяющие отслеживать границу переходов между режимами. Результаты исследований находят применение в технологиях пылеулавливания и пылеосаждения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-71-10040, <https://rscf.ru/project/21-71-03001/>).

Литература

1. Eijkelboom N.M. et al. Particle structure development during spray drying from a single droplet to pilot-scale perspective // J. Food Eng. 2023. Vol. 337. P. 111222.
2. Liu R. et al. Experimental investigation on highly efficient collection and cleaning for fine coal dust particles by dry-wet mixed chemical method // J. Environ. Chem. Eng. 2021. Vol. 9, № 5. P. 105861.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ В НАКЛОННОМ КАНАЛЕ

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

1) Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

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

[*a.karkhov@g.nsu.ru](mailto:a.karkhov@g.nsu.ru)

Изучение двухфазных газожидкостных течений привлекает значительное внимание благодаря активному развитию таких отраслей, как химическая, нефтегазовая и пищевая промышленность. Эти исследования способствуют повышению эффективности производственных процессов и снижению экологических рисков.

Одним из наиболее интересных видов двухфазных течений является пузырьковое, которое широко используется в различных технических областях благодаря своим уникальным характеристикам, таким как высокая степень смешиваемости и способность к эффективному тепло- и массообмену. Одной из особенностей пузырьковых течений является высокая чувствительность к ориентации канала, что делает их поведение особенно интересным для изучения. В частности, угол наклона канала существенно влияет на распределение газовой фазы по его сечению, что, в свою очередь, может изменять динамику течения. Однако контроль дисперсности газовой фазы в наклонных каналах затруднен из-за коалесценции пузырей на пути следования, что может вызвать резкий переход от мелкодисперсного пузырькового режима к снарядному. Добавление поверхностно-активных веществ в несущую фазу может снизить интенсивность коалесценции пузырей в процессе их всплытия. Благодаря этому можно сохранять пузырьковый режим и избежать нежелательного перехода к снарядному.

Цель работы заключается в исследовании влияния поверхностно-активных веществ на характеристики газовых пузырьков, всплывающих в круглом наклонном канале.

В работе, представлены гистограммы распределения пузырей по размерам и скоростям, а также средние значения этих величин, для различных режимных параметров эксперимента: расход газа (3-8 мл/мин), угол наклона канала ($30 \div 60^\circ$). Наблюдения производились на расстояниях 200-400 мм от точки ввода газовой фазы.

Было установлено, что распределение пузырей по размерам зависит от расстояния между точкой ввода газа и местом измерений, и от угла наклона канала. В присутствии ПАВ увеличение угла наклона канала приводит к монотонному уменьшению среднего размера пузырей на всех участках канала, чего не наблюдается в аналогичных экспериментах с водой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№24-21-20023, <https://www.rscf.ru/project/24-21-20023/>) и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области (соглашение № р-90 от 22.03.2024)

ВИХРЕВЫЕ БИОТЕХНОЛОГИИ: ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ПРИЛОЖЕНИЯМ

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

1) Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия 2) Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

[*rz9ou@mail.ru](mailto:rz9ou@mail.ru)

Выполнено исследование структуры течения в газовихревом биореакторе и проведено сравнение с течением культуральной среды в традиционных барботажных плоскопараллельных культиваторах. Одним из основных результатов стало выявленное подобие структуры течения в пассивной жидкости – культивируемой среде биореактора, независимо от способа создания закрутки (твердый диск, жидкий промежуточный слой жидкости, воздушный вихрь). Экспериментально показано, что в отличие от применения механических мешалок, технология перемешивания воздушным вихрем, сформированным активатором, за счет перепада давления и трения воздушного потока, обеспечивает деликатное, но эффективное перемешивание без пенообразования, кавитации, высокотурбулентных, застойных зон и зон локального перегрева [1]. В области над рабочей жидкостью формируется интенсивное вихревое движение, которое плавно приводит в меридиональное движение культивируемую биомассу посредством увеличения скорости на границе раздела [2, 3]. Помимо «бесконтактного» перемешивания воздушный вихрь интенсифицирует и газообмен между культуральной и закручивающей средой, где вместо воздуха может использоваться углекислый газ (CO₂) необходимый для питания микроводорослей. Установлено, что развитие ячейки центробежной циркуляции в жидкости под границей раздела при наличии промежуточной жидкой или газообразной среды происходит аналогично случаю закрутки потока твердым диском. Это позволило перенести ряд важных закономерностей вихревого перемешивания в область современных биотехнологий, направленных на интенсификацию биологических и химических процессов с использованием несмешивающихся сред различной вязкости в вихревых реакторах, а также определить функциональные зависимости между интенсивностью вихревого перемешивания и кривыми роста фототрофных микроводорослей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 24-19-00233, <https://rscf.ru/project/24-19-00233/>).

Литература

1. Sharifullin B. R., Skripkin S. G., Naumov I. V., Zuo Z., Li B., Shtern V.N. Intense vortex motion in a two-phase bioreactor // Water, 2022. 15(1), 94.
1. Naumov I.V., Gevorgiz R.G., Skripkin S.G., Tintulova M.V., Tsoi M.A., Sharifullin B.R. Experimental study of the topological flow transformations in an aerial vortex bioreactor with a floating washer // Biotechnology Journal, 2023. 2200644.
2. Naumov I.V., Gevorgiz R.G., Skripkin S.G., Tintulova M.V., Tsoy M.A., Sharifullin B.R. Topological flow transformations in a universal vortex bioreactor // Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2023. 109467

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗИРОВАНИЯ ВОДНОГО РАСТВОРА ТИМЬЯНА В ПРОЦЕССЕ МИКРОФЛЮИДНОГО ИНКАПСУЛИРОВАНИЯ

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

1) Томский политехнический университет, Томск, Россия

2) Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

^{*}piskunovmv@tpu.ru

Проведено экспериментальное исследование по микродозированию биологически активного вещества - тимьяна обыкновенного - в составе водного раствора говяжьего желатина (рис. 1). Этот раствор микроинкапсулирован в оболочку из водного раствора альгината натрия. Формирование сферических микрокапель в микрофлюидном чипе для двойных эмульсий проводилось с использованием смеси подсолнечного масла и ПАВ Tween 80, которая в данном исследовании представляла непрерывную фазу. Ионное сшивание оболочки из раствора альгината натрия, следствием которого являлось гелеобразование, происходило вне микрофлюидного чипа при попадании микрокапель в сборник с водным раствором хлорида кальция. Варьировались расходы трех жидкостей, подводимых к чипу, концентрация альгината натрия (0,3-0,9 масс. %) и объемное соотношение компонентов раствора тимьяна и желатина (40/60, 30/70, 20/80, 10/90, соответственно). Построены карты режимов (капельный, переходный, снарядный) с обозначением их границ и определены размер и частота формирования микрокапель при детальном исследовании капельного режима. Последнее предполагало построение зависимостей среднего размера и частоты формирования микрокапель от критериев подобия в гидродинамике для установления основополагающих сил, управляющих этими характеристиками. На основе морфологии диффузионной границы между двумя водными растворами высокомолекулярных веществ и относительного расположения потока раствора тимьян-желатин, а также сохранения массы в системе предложена математическая модель, предсказывающая содержание раствора тимьяна в каждой микрокапсуле с учетом варьируемых факторов. Экстракт тимьяна исследован методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) для определения концентрации высокоценных веществ. Результаты микроинкапсулирования и ВЭЖХ в сочетании с разработанным математическим подходом позволили прогнозировать содержание таких веществ в микрокапсуле. Этот подход позволяет оптимизировать производство микрокапсул, содержащих биологически активные и лекарственные вещества, и может быть интегрирован с обработкой графических данных методами машинного зрения.

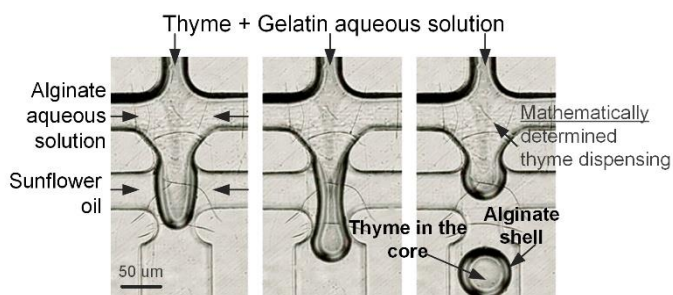


Рис. 1. Кадры микродозирования и микроинкапсулирования раствора тимьяна.

Работа выполнена в рамках государственного задания Департамента образования и науки Ханты-Мансийского автономного округа - Югры (тема № 2023-578-05).

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБАХ ПРИ ТЕЧЕНИИ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Прасолов Д.Ю.* , Бердов Р.Д., Гурина И.Н., Цацуев С.М.

АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Россия

*dmitrii.prasolov@gmail.com

Целью данной работы является выделение особенностей теплообмена, связанного с осаждением к-фазы на стенку, и конвективного теплообмена в проточном тракте газодинамической трубы (ГДТ) при двухфазном течении. Данные условия характерны для высотных стендов РДТТ.

Проведен сравнительный анализ двух серий испытаний. Условия проведения и результаты испытаний первой серии описаны в работе [1]. Испытания второй серии проведены на той же экспериментальной установке и в схожих режимах работы, однако в качестве топлива использовался высокометаллизированный исследовательский состав, описание которого подробно представлено в работе [2]. Сравнительный анализ показал, что численное моделирование течения в пристенной зоне с допущением о «псевдогазе» не позволяет точно описывать распределение статического давления вдоль тракта ГДТ. Для повышения точности необходимо делать определенные поправки давления, которые оказывают значимое и необходимое влияние для корректного прогнозирования конвективных тепловых нагрузок.

Для анализа особенностей, связанных с осаждением из потока на стенку конденсированной фазы продуктов сгорания, разработан программный модуль расчета траекторий движения частиц. На основе расчетных и экспериментальных данных получены значения коэффициентов аккомодации k для осаждаемых частиц. Результаты сравнения представлены на рисунке 1. Также получены такие характеристики частиц как значения осаждаемых фракций частиц, длина зоны осаждения частиц в канале ГДТ, температуры частиц перед их осаждением на стенку.

Полученные особенности теплообмена, связанного с осаждением к-фазы на стенки, и конвективного теплообмена в условиях двухфазного потока в ГДТ позволили в дальнейшем учитывать обозначенные факторы в аналогичных системах.

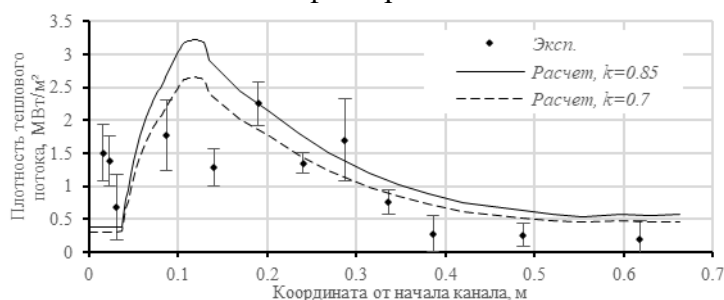


Рис. 1. Результаты расчета.

Литература

1. Нугуманов Д.И., Бердов Р.Д., Головатюк А.С., Киселева В.С., Тимаров А.Г. Экспериментальное определение тепловых нагрузок на конструкцию сверхзвукового выхлопного диффузора // Прикладная механика и техническая физика. - 2025. DOI: 10.15372/PMTF202415614
2. Бердов Р.Д., Волкова Л.И., Головатюк А.С. Термохимическое разрушение углеродных композитных материалов при стендовых испытаниях на твердом топливе // Прикладная механика и техническая физика. - 2025. DOI: 10.15372/PMTF202415531.

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ И СШИТЫЕ ГЕЛЕВЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИАКРИЛАМИДА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

Пряжников М.И.^{1*}, Хеди Б.¹, Волченко Е.Н.¹, Пряжников А.И.¹, Минаков А.В.¹

1) Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

^{*}arrivent@yandex.ru

Повышение нефтеотдачи — актуальная задача нефтегазовой промышленности. Традиционные методы сталкиваются с ограничениями из-за неоднородности пласта и сложности геологических условий. Полиакриламид (ПАА) — полимер, который широко используется в задачах полимерного повышения нефтеотдачи и гидроразрыва пласта (ГРП). Его применение обусловлено рядом преимуществ, которые он предоставляет в процессе добычи нефти. Он обеспечивает контролируемый рост трещины, хорошую остаточную проводимость и чистоту трещины без хлопьев и осадка, обеспечивает лучший контроль подвижности жидкостей. Тем не менее, имеется ряд проблем, ограничивающих его применение. Одним из решений перечисленных проблем является модификация растворов при помощи наночастиц [1]. Использование наночастиц в качестве добавок позволяет изменить смачиваемость горных пород, снизить поверхностное натяжение, улучшить реологические свойства.

Целью работы является исследование реологических и вязкоупругих свойств полимерных растворов и сшитых гелей на основе ПАА, содержащих наночастицы, а также оценка их эффективности при помощи фильтрационных экспериментов.

Проведены лабораторные исследования по разработке нефтевытесняющих полимерных композиций с добавлением наночастиц различного размера и состава, в том числе углеродных нанотрубок. Выполнено систематическое изучение реологии, а также вязкоупругих свойств. Получены зависимости реологических параметров полимеров от концентрации, формы и размера, а также материала нанодобавок.

Синтезированы оригинальные термостсшивающиеся полимерные и гелевые системы на основе полиакриламида. В качестве альтернативы высокотоксичным веществам, часто используемым при разработке гелей для ГРП, предложены малотоксичные соединения. В исследовании в качестве сшивателей использовались глиоксаль и гексамин. Их применение позволит снизить нагрузки на окружающую среду. Проведены тесты на термостабильность. После выдержки проведено исследование вязкости и вязкоупругих свойств синтезированных гелей. Показано, что варьированием концентрацией сшивателей и температурой сшивки можно управлять реологическими параметрами и степенью сшивки синтезированных гелей. Выполнено экспериментальное исследование течения гелей в микромодельной трещине. Продемонстрирован процесс сшивания геля при его прокачивании в микромодели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>).

Литература

1. Minakov A. V., Pryazhnikov M. I., Neverov A. L., Sukhodaev P. O., Lysakova E. I., Skorobogatova A. D. A systematic study of the effect of nano-additives on the functional characteristics of hydraulic fracturing gels // – Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects (2024) 702, №135057, P.1–16.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРОЦЕСС ФРАГМЕНТАЦИИ ПО ТИПУ ПАРАШЮТ ПРИ ОБДУВЕ ПЛАНАРНОЙ ГРАНИЦЫ ЖИДКОСТИ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Сергеев Д.А.^{1*}, Троицкая Ю.И.¹, Зотова А.Н.¹, Ермакова О.С.^{1*}, Краев И.М.¹

1) *Институт прикладной физики им А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия*

*[*daniil@ipfran.ru](mailto:daniil@ipfran.ru)*

Как показал ряд исследований, явление фрагментации по типу «парашют» (в англоязычной терминологии - «bag breakup»), являются доминирующим процессом, приводящим к образованию дисперсной фазы при обдуве газовыми потоками планарной границы свободной поверхности жидкости в широком диапазоне пространственно-временных масштабов процессов. Например, с одной стороны в тонкопленочных течениях в трубах в приложении к различного рода технических задач (см., [1]), а с другой стороны в процессах образования морского аэрозоля при взаимодействия воздушных потоков атмосферы с морской поверхностью [2]. При этом к настоящему времени изучить физические механизмы, определяющие эволюцию этих мелкомасштабных быстропротекающих явлений, было затруднительно из-за спорадического характера их возникновения. В настоящей работе использовалась специальная система искусственной генерации «парашюта», которая была разработана в работе [3]. Теневой метод визуализации в сочетании с высокоскоростной съемкой позволил детально изучить этот процесс в контролируемых условиях и получить необходимые ансамбли реализаций для накопления статистики в контролируемых условиях. Известно, что при фрагментации по типу «парашют» капли образуются двумя способами. Мелкие капли образующиеся при разрыве пленки купола, и крупные при фрагментации утолщенного ободка. Специальные методы обработки позволили определять размеры купола, толщину пленки, детектировать образующиеся капли (отдельно для купола и отдельно для ободка). Анализ зависимости количества «пленочных» капель от управляющего параметра, в качестве которого было выбрано число Вебера, позволили сделать вывод, что разрыв пленки купола происходит под действием исключительно неустойчивости Релея-Тейлора в отличие от фрагментации ободка, которая наряду с этой неустойчивостью также значительной степени определяется неустойчивостью Плато-Релея. Полученные результаты позволяют построить теорию, количественно описывающую процесс выноса дисперсной фазы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-17-00299 (<https://rscf.ru/project/24-17-00299/>), с использованием оборудования УНУ Комплекс крупномасштабных геофизических стендов ИПФ РАН.

Литература

1. Cherdantsev A.V., Sinha A., Hann D.B. Studying the impacts of droplets depositing from the gas core onto a gas-sheared liquid film with stereoscopic BBLIF technique // International Journal of Multiphase Flow. – 2022. – V.150. – P. 104033.
2. Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S. The ‘Bag Breakup’ Spume Droplet Generation Mechanism at High Winds. Part I: Spray Generation Function // J. Phys. Oceanogr. — 2018. — V. 48. — I. 9. — P. 2167-2188.
3. Kandaurov, A. A., and D. A. Sergeev, 2021: A system of artificial initiation of the bag breakup fragmentation for investigation of the spray generation processes during wind-wave interaction in laboratory experiments. Atomization Sprays, – V.31 – P. 21–33.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ СМАЧИВАЕМОСТИ СУПЕРЛИОФОБНЫХ ЛАЗЕРНОТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ РАЗРЕЖЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

Смирнов Н.И.^{1,2*}, Родионов А.А.^{1,2}, Васильев М.М.^{1,2}, Шухов Ю.Г.¹, Старинский С.В.^{1,2}

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

^{*}*n.smirnov3@yandex.ru*

Суперлиофобные поверхности представляют значительный интерес для различных инженерных и технологических приложений, включая управление потоками жидкости, защиту от коррозии и обледенения, самоочищение и интенсификацию теплообмена. Смачиваемость поверхности определяется химическим составом и морфологией, включая шероховатость и микроструктуру, которые определяют режим контакта жидкости с поверхностью. В режиме Вензеля жидкость полностью заполняет шероховатости поверхности. Если поверхность лиофобная, шероховатость увеличивает краевой угол, при сохранении полного контакта жидкости с материалом. В режиме Касси-Бакстера жидкость только частично взаимодействует с поверхностью, удерживаясь на микроструктурных выступах, а в углублениях остается воздух или пар, снижающие контактную площадь и обеспечивающие суперлиофобность. Удаление газа из пор материала может привести к переходу режима смачиваемости от Касси-Бакстера к Вензелю, что приводит к потере суперлиофобных свойств. Таким образом, создание и изучение суперлиофобных материалов, сохраняющих свои свойства в условиях разреженной атмосферы, является актуальной задачей, поскольку предполагается, что суперлиофобные, как с точки зрения понимания механизмов перехода между режимами смачивания, так и для практического применения в космических приложениях.

Целью работы являлось изучения свойств смачиваемости суперлиофобных поверхностей при различном давлении фонового окружения. Поверхности были получены осаждением фторполимера методом HW CVD на монокристаллический кремний, модифицированный наносекундной лазерным излучением. Исследуемые поверхности устанавливались в вакуумную камеру под углом $7,9^\circ$ к горизонту для обеспечения свободного скатывания капли жидкости при нормальных условиях. Над поверхностью была размещена система подачи капель жидкости. Также к исследуемой поверхности были подведены нагревательный элемент и термopара. Образцы были дегазированы путем длительного нагрева в условиях вакуума (10^{-2} Па). В качестве тестовой жидкости использовался глицерин, обладающий низким давлением насыщенного пара в сравнении с водой, что позволяет использовать его в высоком вакууме с нагревом поверхности до 300°C . Динамика движения капель по поверхности фиксировалась теневой видеосъемкой с использованием высокоскоростной камеры.

Установлено, что после разрежения атмосферы и дегазации измеренный краевой угол смачивания образцов сохраняется и составляет 150° , что свидетельствует о сохранении суперлиофобных свойств. Обнаружено уменьшение скорости скатывания капель в вакууме (7,1 мм/с при 10^{-2} Па, против 8,6 мм/с при 10^5 Па, при комнатной температуре). Нагрев поверхности приводит к росту скорости скатывания, что объясняется снижением вязкости жидкости. При температуре 300°C достигались максимальные скорости качения капель и составляли 45,5 мм/с в вакууме, 75,7 мм/с при атмосферном давлении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 24-19-00664, <https://rscf.ru/project/24-19-00664/>)

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛАЖНО-ПАРОВЫХ ПОТОКОВ В ТУРБОМАШИНАХ

Тищенко В.А.¹, Попов В.В.¹, Гаврилов И.Ю.¹, Грибин В.Г.¹, Тищенко А.А.¹,
Бердюгин К.А.¹, Соколов Д.Г.^{1*}, Смирнов А.О.¹

1) Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, 111250, Москва, Россия
*SokolovDG@mpei.ru

В работе описывается разработанный на основе нейронных сетей подход по обработке и анализу результатов экспериментальных исследований влажно-паровых потоков в проточных частях паровых турбомашин. Система лазерной диагностики потоков — мощный инструмент бесконтактного определения полей скоростей движущихся в среде трассеров, засвеченных лазерным лучом. В данном случае трассерами являются частицы жидкой фазы, представляющие собой полидисперсную дискретную среду, движущуюся в паровом потоке. Результаты работы системы лазерной диагностики — парные изображения засвеченных лазером капель, сделанные в интервале нескольких сотен наносекунд. Алгоритмы PIV и PTV, обрабатывая эти фотографии, получают поля скоростей дискретной фазы. Проблемы применения подобных систем во влажно-паровых потоках связаны с низким качеством получаемых изображений, что усложняет процесс их пост-обработки перед применением PIV/PTV методов, снижает точность определения векторов скоростей капель. Для решения этой проблемы была разработана нейронная сеть по детектированию капель на получаемых фотографиях. Ее задачей является формирование дискретных изображений (0 — капли нет, 1 — капля есть), что позволяет применять PIV/PTV методы к «чистым» изображениям без искажений.

Для обучения подобной нейронной сети была разработана специальная методика, позволяющая генерировать характерные для влажно-паровых потоков изображения капельных потоков с заведомо известными позициями капель на них. Она основана на генеративно-состязательной нейронной сети [1], создающей синтетические изображения высокой степени похожести на реальные, с наложенными на нее образами капель из библиотеки, сформированной путем ручной обработки экспериментальных фотографий.

Проведено сравнение эффективности обработки экспериментальных данных посредством нейронной сети и традиционного подхода. Применение модели машинного обучения позволило увеличить объем информации о скоростях капель (так как увеличилось количество детектируемых методами PIV/PTV капель); упростить процесс пост-обработки изображений, уменьшив затрачиваемое на эту операцию время; ускорить работы самих алгоритмов PIV/PTV (за счет применения менее затратных алгоритмов детектирования капель). Разработанный подход позволил определить скоростные параметры капельных потоков в тех областях течения, где ранее этого не удавалось сделать из-за низкого качества изображений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-19-00445, <https://rscf.ru/project/23-19-00445/>).

Литература

1. Radford, Alec, Luke Metz, and Soumith Chintala. "Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks." arXiv preprint arXiv:1511.06434 (2015)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОХИЧЕСКОГО МЕТОДА ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСТВОРОМ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА НА КОЛЛЕКТОРЫ С ТЯЖЕЛОЙ НЕФТЬЮ

Хасанов Д.^{1*}, Диева Н.Н.¹

1) РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

[*hasanov.tm@mail.ru](mailto:hasanov.tm@mail.ru)

В связи увеличением доли трудноизвлекаемых запасов в последнее время возрос интерес к генерации тепла на нефтегазовом производстве благодаря закачке термохимических жидкостей, оказывающих комплексное воздействие на продуктивность скважин. В рамках такого подхода на первый план выходят технологии использования перекиси водорода (H_2O_2) в качестве жизнеспособной технологии увеличения нефтеотдачи. Таким образом, цель данной работы состоит из анализа учета влияния различной концентрации раствора H_2O_2 на эффективность тепловыделения и соответственно на показатели разработки при пероксидной обработке коллекторов с тяжелой нефтью. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- сформулировать математическую модель многокомпонентной неизоэнтальпической многофазной фильтрации несжимаемых жидкостей и газовой фазы с учетом тепломассобмена и кинетики химической реакции.
- рассчитать величину дебитов при воздействии термохимическим методом и без него.

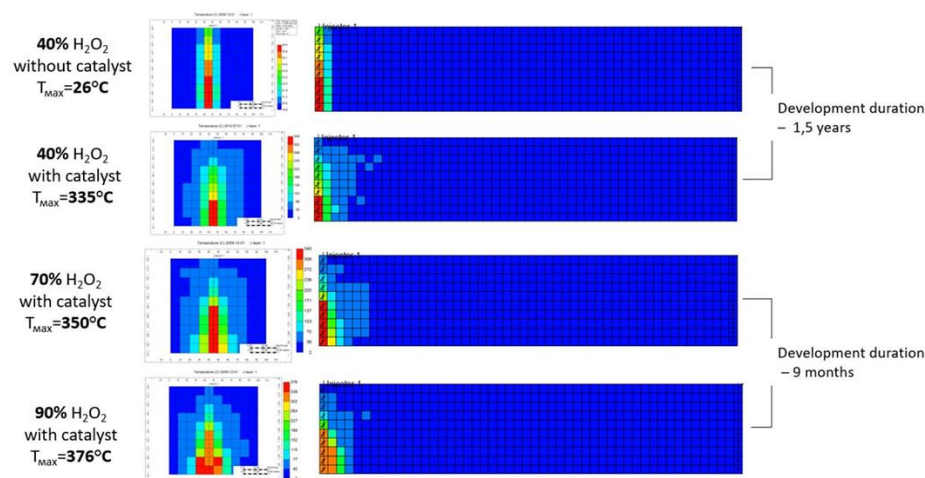


Рис. 1. Изменение температуры в зависимости от концентрации и наличия катализатора.

Исходя из результатов, эффективный нагрев пласта до высоких температур (более $100^{\circ}C$) при закачке и разложении H_2O_2 возможен только при наличии катализатора. Без катализатора процесс нагрева идет слишком медленно, особенно при концентрации перекиси водорода до 90 % масс. В присутствии катализатора температура достигает $350^{\circ}C$. В частности, при концентрации пероксида 90% масс.

Литература

1. Bayless J.H. Hydrogen peroxide applications for the oil industry 2000; 221: 50–53
2. Popov E., Askarova A., Mukhametdinova A., Maksakov K., Usachev G., Darishchev V., et al Evaluation of the applicability of in-situ combustion in a heavy oil carbonate field with high initial oil saturation. J Pet Sci Eng 2021; 207: 109146.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ КАПЛИ ГЛИЦЕРИНА ПО НАКЛОННОЙ ГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Шаин А.М.^{1*}, Смирнов Н.И.¹, Старинский С.В.¹, Вожаков И.С.¹

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

a.shain@g.nsu.ru

При движении капли глицерина по наклонной поверхности наблюдается заметный рост скорости капли с увеличением температуры подложки, что может быть связано с изменением вязкости с нагревом. Для изучения природы такого поведения капли, в настоящей работе было выполнено численное моделирование падения капли глицерина на наклонную поверхность при значениях вязкости, соответствующих различным значениям температур, при неизменных остальных параметрах жидкости. Моделирование проводилось с использованием кода Basilisk [1] в рамках уравнений Навье-Стокса для свободной поверхности. Выбор данного подхода обусловлен его высокой точностью при разрешении динамики межфазной границы, реализованной через метод VOF [2], который обеспечивает консервативное отслеживание границы раздела фаз за счёт адвекции объемной доли жидкости.

Результаты моделирования демонстрируют количественное согласие с экспериментальными данными (рис. 1) в широком диапазоне температур (24–300°C). Расхождение расчетных и экспериментальных данных, не превышающее 12%, может быть связано с неполным прогревом жидкости, температурной зависимостью поверхностного натяжения или возможным возникновением термокапиллярных течений (эффект Марангони), которые не описывались в рамках выбранного подхода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-71-10081, <https://rscf.ru/project/23-71-10081/>).

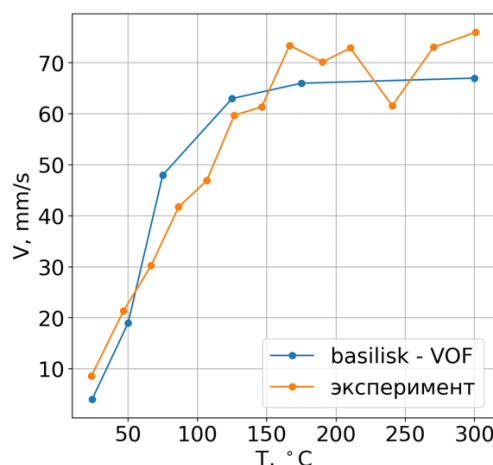


Рис. 1. Зависимость средней скорости капли от температуры для эксперимента и расчета.

Литература

1. López-Herrera J. M., Popinet S., Castrejón-Pita A. A. An adaptive solver for viscoelastic incompressible two-phase problems applied to the study of the splashing of weakly viscoelastic droplets // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 264. P. 144-158.
2. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // *Journal of Computational Physics*. 1981. Vol. 39, No. 1, P. 201-225.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БУРЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОМЫВКИ СКВАЖИНЫ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫМИ БУРОВЫМИ РАСТВОРАМИ

Шебелев А.В.^{1*}, Гаврилов А.А.¹, Минаков А.В.¹

1) Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

* aleksandr-shebelev@mail.ru

В статье представлены результаты численного исследования течения неньютоновских жидкостей, модифицированных углеродными нанотрубками (УНТ), в кольцевых каналах, моделирующих условия бурения скважин. Установлено влияние концентрации УНТ на эффективность выноса шламовых частиц и динамику перепада давления в системе. На основе методов вычислительной гидродинамики (CFD) получены детализированные картины распределения фаз, скоростей и гидродинамических параметров суспензии в кольцевом канале.

Модификация буровых растворов наноматериалами, включая наночастицы оксидов металлов и углеродные нанотрубки, направлена на оптимизацию их реологических и фильтрационных свойств, что критически важно для повышения эффективности бурения. Численное моделирование многофазных течений позволило определить диапазоны оптимальных концентраций наночастиц, обеспечивающих баланс между эффективностью выноса частиц шлама и минимизацией энергозатрат.

Результаты исследования показали, что добавление любого типа наночастиц положительно влияет на эффективность процесса бурения.

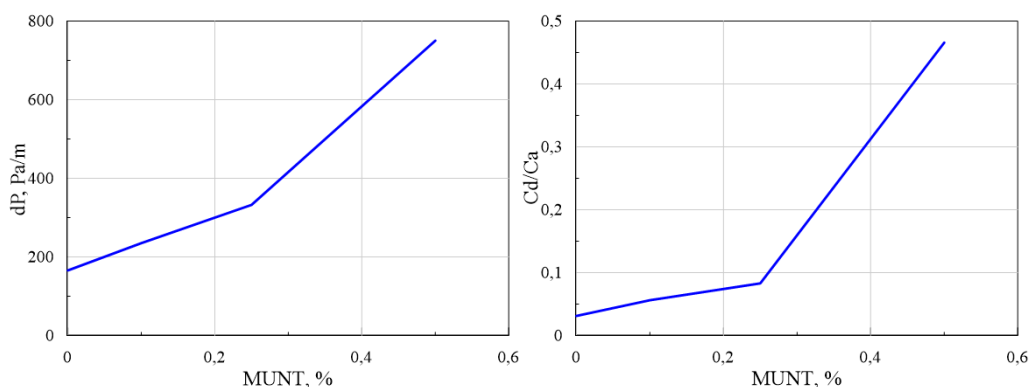


Рис. 1. Зависимость эффективности выноса шлама от концентрации добавки МУНТ для бурового раствора на водной основе.

Добавление МУНТ к буровому раствору на водной основе значительно увеличивает его способность к эффективному переносу шлама (рис. 1). Прибавка составляет 12 раз, при этом перепад давления увеличивается только в 4,1 раза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-79-30022, <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>).

Литература

1. Гаврилов А.А., Шебелев А.В. Одножидкостная модель смеси для ламинарных течений высоконцентрированных суспензий // – Известия РАН. Механика жидкости и газа(2018), № 2, с. 84–98.
2. Cheng N.S., law A. W. K. Exponential formula for computing effective viscosity // J. Powder Technol.(2003) 129, p.156–160.

МЕТОД ЗОНИРОВАНИЯ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ НА ОСНОВЕ БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ КОМФОРТА

Шульженко П.Д.^{1*}, Мешкова В.Д.¹, Литвинцев К.Ю.², Дектерев А.А.^{1,2}

1) *Сибирский федеральный университет Красноярск, Россия*

2) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

**shulzhenko.polina@yandex.ru*

Исследования аэродинамики городской застройки показывают, что на направление и силу ветра влияют не только климатические особенности данной территории, особенности ландшафта, но и форма, размеры и плотность застройки. Для комплексной и наиболее полной оценки влияния внешних условий на формирование биоклиматического комфорта внутри городского пространства, необходимо учитывать все факторы, формирующие микроклимат территории.

В работе представлены результаты разработки метода оценки пешеходного комфорта, комплексно учитывающего теплофизические процессы, на основе которых происходит формирование ветрового и температурного режима территории. Данный метод был разработан совместно специалистами Сибирского Федерального Университета и Института Теплофизики СО РАН [1] и реализован в программном модуле «SigmaPedestrianComfort». На основе обработки полученных при численном моделировании полей метеовеличин, используя 10 биоклиматических критериев комфортности выполняется зонирование пространства по уровню пешеходной комфортности.

Алгоритм проведения исследования, с использованием данного метода, состоит из 6 последовательных этапов. Сначала выбирается область городского пространства (городской район), для которого производится сбор и анализ метеоданных. На основе проведенного анализа выбирается наиболее подходящий метеорологический сценарий. Следующим этапом идет построение геометрии и расчетной сетки для рассматриваемой области городской застройки. После подготовительных работ производится численное моделирование аэродинамики и тепломассообмена для выбранного объекта исследования. На основе полученных данных о значениях скорости, температуры, влажности и потока солнечного излучения, производится расчет биоклиматических показателей комфорта. После того программный модуль автоматически производит зонирование территории по уровню комфорта для человека.

Методика зонирования по уровням пешеходного комфорта была апробирована на разных видах морфотипов городской застройки. Исследование показало, что на формирование комфортных условий влияние оказывают комплексы теплофизических характеристик.

Предложенный метод может быть использован для любого городского пространства, так как он является универсальным.

Литература

1. Dekterev A.A., Litvintsev K.Yu., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B., The development of free engineering software package for numerical simulation of hydrodynamics, heat transfer, and chemical reaction processes // Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. – 2017. – 10 (4). – pp. 105-112.

**СЕКЦИЯ 3. ТЕПЛОМАССООБМЕН ПРИ
ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ,
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА,
КИПЕНИЕ, ТЕПЛОФИЗИКА МИКРО- И
НАНОСИСТЕМ, ПРОЦЕССЫ В
РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗАХ И ПЛАЗМЕ**

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР МИКРО- И НАНОМАСШТАБОВ

Баринов А.А.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

Москва, Россия

barinov@bmstu.ru

Целью работы является анализ факторов, которые необходимо учитывать при рассмотрении теплопереноса и расчете эффективной теплопроводности и теплоемкости полупроводниковых структур микро- и наномасштаба. Данная задача актуальна при моделировании теплофизических свойств и установления влияния определяющих факторов на интенсивность переноса тепла в полупроводниковых устройствах [1].

Анализ теплопереноса в структурах микро- и наномасштаба показал, что определяющими параметрами являются [2]: температура, средняя длина волны фононов, средняя длина свободного пробега и морфология образца: характерные размеры (толщина, длина плёнки и пр.) и характеристики шероховатости поверхности (средняя квадратичная шероховатость, длина корреляции и пр.). Таким образом задача является многопараметрической и принципиально отличающейся от классической «макроскопической» теплофизики, что выражается в виде появления размерного, квантово-размерного и поверхностного эффектов [1].

Основные тезисы из проведенного анализа [2]. Во-первых, принципиальным является то, что анализ теплопереноса в полупроводниках и диэлектриках строится на рассмотрении статистики фононного газа, состояние которого в целом определяется температурой (статистика Бозе-Эйнштейна). Во-вторых, свойства фононного газа зависят от свойств кристаллической решетки, в частности, от модели дисперсии. Так наличие размерного эффекта, приводит к непосредственному влиянию геометрии образца (толщины пленки, ширины, и пр.) на возможные (разрешенные) состояния фононов. В-третьих, появляется анизотропия: эффективная теплопроводность зависит от рассматриваемого направления распространения тепла в образце и ориентации кристаллической решетки по отношению к границам структуры. В-четвертых, существенную роль в теплопереносе оказывает взаимодействие баллистических фононов с шероховатыми границами наноструктур. Здесь возникает фундаментальная задача, решение которой требуется для создания надежного и достоверного метода расчета эффективной теплопроводности – учет сложной морфологии образца и расчет взаимодействия фононов с реальной границей твердого тела.

Также сформулирован метод оценки режима теплопереноса и вида рассеяния фононов на границе структуры в зависимости от величины характерного размера образца и температуры. В качестве примера проведены расчеты для кремния и получены диаграммы, которые могут быть использованы на практике.

Литература

1. Теплофизика для наноэлектроники / В.И. Хвезюк // Материалы IV Международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов» (МММЭК–2022), 24–26 октября 2022 г., Москва. – Москва : МАКС Пресс, 2022. – 180 с. : ил. С.120-123.
2. Баринов А.А. Разработка метода расчета теплопроводности тонких пленок на основе статистических моделей взаимодействия фононов с шероховатыми границами наноструктур: авт. дис. ... к-та. техн. наук: (01.04.14). М., 2022. 18 с..

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ ПОТОКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИКРОФЛЮИДНОГО ТЕПЛОБМЕННИКА

Батыршин К.Э.^{1*}, Солнышкина О.А.¹, Батыршин Э.С.¹

1) Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

*batyrshin.karim@gmail.com

Развитие современных микроэлектронных систем сопровождается увеличением скорости работы, что ведет к увеличению рассеиваемой ими тепловой мощности. Этот факт вынуждает искать новые эффективные способы отвода тепла от микроэлектронных компонентов. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование микрофлюидных теплообменников [1]. Эффективность работы таких теплообменников может быть оптимизирована в результате подбора наиболее подходящей геометрии микроканалов. Целью нашей работы является экспериментальное изучение эффективности микротеплообменников, структура порового пространства которых образована упорядоченной системой цилиндрических столбиков.

Для экспериментов изготавливались теплообменники из меди. Одна из поверхностей теплообменника была изготовлена из стекла для визуализации потока. Система столбиков на поверхности меди создавалась путем электроосаждения [2]. На рис. 1 показаны структуры микроканалов этих теплообменников. Отличие структур заключается в способе распределения теплоносителя. Нагрев теплообменника осуществлялся нагревательным элементом с постоянной температурой 75 °С. К теплообменнику подключались трубки для подвода и отвода теплоносителя. Термодпары устанавливались для измерения температуры теплоносителя на входе и выходе из теплообменника. Показания с термодпар считывались с помощью устройства ввода-вывода NI USB-6356. Данные выводились на компьютер и анализировались. Подача теплоносителя производилась при постоянном давлении. Объемный расход жидкости и давление регистрировались с использованием сенсоров MFS-D-4 и MPS-V2-S-4 (Elveflow).

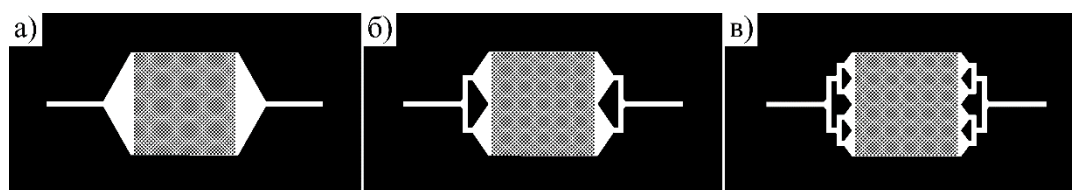


Рис. 1. Структура микроканалов.

В результате экспериментов были получены зависимости, характеризующие эффективность работы теплообменников, при изменении объемного расхода теплоносителя, геометрии подводящих микроканалов, параметров упаковки поровой структуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 24-19-00697, <https://rscf.ru/project/24-19-00697/>).

Литература

1. Gulia V., Sur A. A comprehensive review on microchannel heat exchangers, heat sink, and polymer heat exchangers: current state of the art // *Frontiers in Heat and Mass Transfer*. – 2022. – V. 18
2. Zhang Z., He R. Preparation of microfluidic chips by electroplating and used for microdroplet study // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. – V. 2652

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ НА ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ВСТАВОК

Бобылев П.Г.^{1*}, Павлов А.В.¹, Андрейко С.В., Митяков В.Ю.

1) Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург Россия

* pavel_b.g.97@mail.ru

В работе рассмотрен способ управления плотностью теплового потока при кипении воды при моделировании работы двухфазной системы охлаждения силовой электроники. Проблема увеличения тепловой нагрузки и как следствие мощности силовых приборов заключается в невозможности отвести такие тепловые потоки от силового модуля. Самый эффективный способ отвода теплоты – кипение – ограничен наступлением кризиса. В работе предложен метод упрощенного отвода пара от поверхности теплообмена с использованием изотермических вставок. Используемые вставки позволяют дробить паровые пузыри на более мелкие, что снижает вероятность запаривания поверхности, а также на них реализуется эффект «скольжения» жидкости вдоль не обогреваемой стенки изотермической вставки без препятствия со стороны паровых пузырей. Основной метод исследования в данной работе – градиентная теплометрия. Подробнее о методе и об экспериментальном стенде написано в статье [1]. Схема экспериментальной модели с изотермическими вставками представлен на рис. 1.

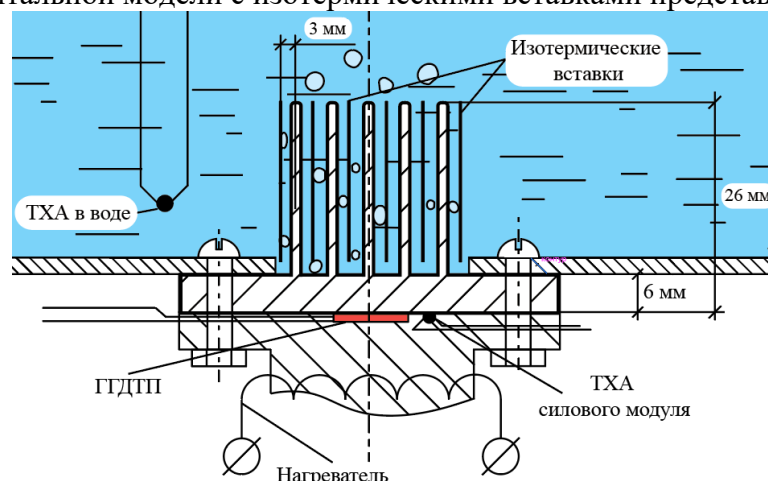


Рис. 1. Схема эксперимента

Результатом работы стала зависимость местной плотности теплового потока от температуры моделируемого силового модуля в зависимости от шага оребрения при использовании изотермических вставок. Доказана работоспособность предлагаемого способа управления плотностью теплового потока при больших (> 7 мм) расстояниях между ребрами. Намечены дальнейшие исследования по данному направлению с использованием дополнительно ограничителей потока жидкости.

Литература

1. Андрейко, С. В. Градиентная теплометрия в исследовании теплообмена при кипении воды с микрочастицами Al_2O_3 на пластине / С. В. Андрейко, А. В. Павлов, П. Г. Бобылев // Бутаковские чтения: Сборник статей IV Всероссийской с международным участием молодёжной конференции, Томск, 10–12 декабря 2024 года.

ВЛИЯНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ЛАЗЕРНО-ТЕКСТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ НА ДИНАМИКУ ВСКИПАНИЯ ПАДАЮЩЕЙ КАПЛИ ВОДЫ

Васильев М.М.^{1*}, Миськив Н.Б.¹, Смирнов Н.И.^{1,2}, Терехов В.В.¹, Старинский С.В.^{1,2}

1) Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

2) Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*vasilevmik.arck@gmail.com

Процесс взаимодействия капли с нагретой поверхностью играет ключевую роль в спрейнном охлаждении [1], обеспечивая эффективный отвод. Данный процесс является сложным, зависящим как от условий окружающей среды, так и от характеристик капли и поверхности. Ключевыми факторами, влияющими на динамику взаимодействия, являются свойства смачивания, шероховатость, микро- и наноструктура поверхности [2]. В данной работе исследовано влияние микро- и наноструктур лазерно-текстурированного кремния на динамику вскипания падающей капли воды. Было подготовлено пять типов текстурированных поверхностей, включая GraySi, BlackSi, а также модифицированные варианты BlackSi с оксидом цинка (BlackSi+ZnO) и после обработки в плавиковой кислоте (BlackSi+HF). После обработки проведены эксперименты по падению капель на перегретые подложки в диапазоне температур от 100 °С до 260 °С и чисел We от 6 до 228. Для всех поверхностей построены карты режимов взаимодействия (рис. 1). Результаты исследования показали, что микро- и наноструктура поверхности влияют на режимы удара и кипения капель, что имеет важное значение для разработки эффективных методов теплообмена.

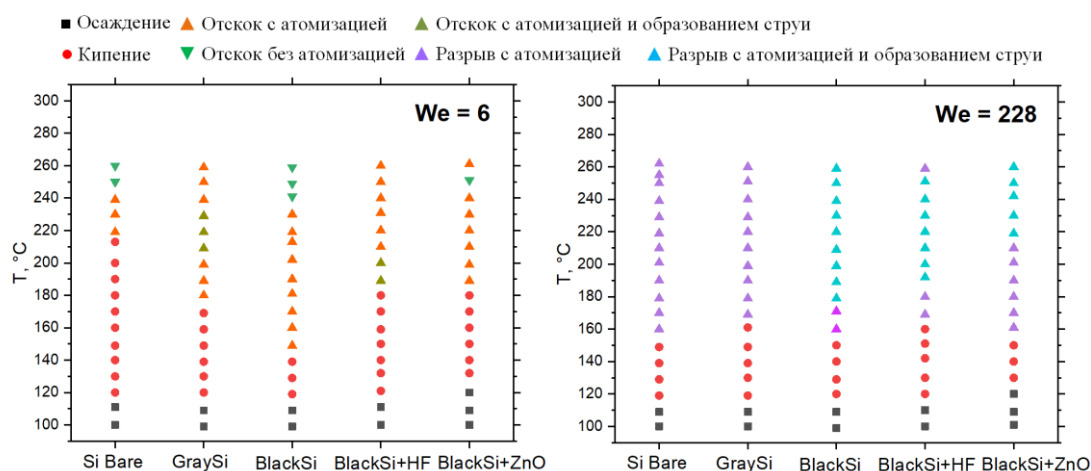


Рис. 1. Карта режимов T - We для различных модифицированных поверхностей кремния при $We=6$ и $We=228$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 24-19-00664, <https://rscf.ru/project/24-19-00664>).

Литература

1. Visaria M., Mudawar I. Application of two-phase spray cooling for thermal management of electronic devices //IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2009. – Т. 32. – №. 4. – С. 784-793.
2. Liang G., Mudawar I. Review of drop impact on heated walls //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Т. 106. – С. 103-126.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕКАТИВНО-ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CF₄/AR ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Гарифуллин И.Ш.^{1*}, Батыршин К.Э.¹, Солнышкина О.А.¹, Батыршин Э.С.¹

1) Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

* GarifullinIsh@yandex.ru

Реактивное ионное травление кремниевых пластин, позволяющее создавать на их поверхности сложные микро- и наноструктуры, является одним из ключевых процессов при изготовлении микроэлектронных устройств [1]. Этот метод сочетает в себе преимущества химического и физического травления, обеспечивая высокую анизотропию профиля травления. В рамках данной работы изучался процесс реактивно-ионного травления в индуктивно связанной плазме. Рассмотрено влияние различных параметров плазмы, таких как мощность основного источника, потенциал смещения, соотношение газов CF₄/Ar на скорость травления.

Для тестирования режимов плазмохимической обработки были использованы кремниевые подложки с кристаллографической ориентацией (100) толщиной 460 мкм (АО «Телеком-СТВ»). Установка для плазмохимического травления EPOS-GLASS-RIE (ООО «ЭПОС-Инжиниринг») оснащена двумя ВЧ-генераторами: основным (максимальная мощность 500 Вт) и генератором смещения подложкодержателя (максимальная мощность 300 Вт). Для формирования микроканалов на кремневой подложке использовалась стандартная процедура фотолитографии и рассматривалось несколько комбинаций защитных масок. В первом случае наносился фоторезист ФН-16-У7 (АО «НИОПИК») - для формирования микроструктуры использовался проявитель ПП-051МС (АО «НИОПИК»). Во втором случае на поверхность кремния методом магнетронного напыления наносился Cr толщиной 100 нм – травление проводилось с использованием раствором глицерин/HCl (1:1 по объему). В третьем случае использовалась многослойная маска Cr/Cu толщиной 100/500 нм - для травления меди применялся 1% раствор (NH₄)₂S₂O₈ (АО «Химреактивснаб»). Во всех случаях на поверхности кремния формировались маски для вытравливания прямых каналов шириной 200 мкм. Реализованы следующие режимы травления: общее время для всех образцов составляло 20 минут, мощность основного источника варьировалась 300-500 Вт, мощность источника смещения 100-250 Вт, соотношение газов CF₄/Ar = 3:1 и 1:1 при постоянном расходе 12 стандартных кубических сантиметров в минуту. Профиль полученных каналов изучался с помощью сканирующего электронного микроскопа.

В результате исследования определены оптимальные режимы для формирования микроструктуры в кремнии: мощность основного источника, мощность смещения подложкодержателя, соотношение газов CF₄/Ar на скорость травления и анизотропию профиля каналов. В дальнейшем полученные результаты будут использоваться для изготовления микрофлюидных чипов для изучения теплообмена в современных технических решениях индустрии микроэлектроники.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ 24-19-00697, <https://rscf.ru/project/24-19-00697/>)

Литература

1. C. Weigel, U. Brokmann, M. Hofmann, A. Behrens, E. Rädlein, M. Hoffmann, S. Strehle, S. Sinzinger, Perspectives of reactive ion etching of silicate glasses for optical microsystems //Journal of Optical Microsystems. – 2021. – Т. 1. – №. 4. – С. 040901 040901.

МЕЖФАЗНЫЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС НА МИКРОМАСШТАБЕ ПРИ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ

Гатапова Е.Я.*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[*egatapova@gmail.com](mailto:egatapova@gmail.com)

Большой интерес для инженеров и исследователей представляет возможность использования сверхинтенсивного испарения тонких пленок жидкости в системах охлаждения нового поколения. Одной из до конца нерешенных фундаментальных задач в данной области является понимание механизмов тепло- и массообмена на границе раздела жидкость-пар в ограниченных областях, которые не могут быть описаны в континуальном приближении, так как влияние эффектов, происходящих в слое Кнудсена на общий теплообмен, может быть значительным. Проводились систематические измерения температурного профиля на межфазной границе на масштабе длины свободного пробега молекулы в климатической камере при пониженном давлении для системы вода-водяной пар. Особенностью исследований, представленных в данной работе, является то, что измерения проведены для случая испарения жидкости в собственный пар внутри климатической камеры в условиях пониженного давления. Данные получены на микроуровне, а именно, температура определена с разрешением 3 мкм и точностью 0.01К. Такие данные в литературе отсутствуют. Полученные результаты обладают абсолютной новизной и разрешают два главных вопроса процесса фазового перехода: определены величины скачков температур на межфазной границе и впервые представлено экспериментальное подтверждение существования обратного градиента температуры (inverted temperature gradient paradox) [1]. В докладе также будут представлены способы моделирования процесса испарения/конденсации на основе уравнений Больцмана [2,3]. Также приводится подход к теоретическому описанию величины скачка температуры для многоатомного газа с несколькими степенями свободы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 25-19-00959, <https://rscf.ru/project/25-19-00959/>).

Литература

1. Gatapova E.Y. Evaporation into half-space: Experiments with water at the molecular mean free path scale // *Physics of Fluids* (2024) 36 (9) 091707.
2. Graur I.A., Batueva M.A., Moritz W., Gatapova E.Ya. Non-equilibrium condensation // *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2022) 198, 123391.
3. Graur I.A., Gatapova E.Ya., Moritz W., Batueva M.A. Non-equilibrium evaporation: 1D benchmark problem for single gas // *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2021) 181, 121997.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИПЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ МИКРОКАНАЛЕ

Зорькина А.И.^{1,2*}, Павлов И.А.^{1,2}, Роньшин Ф.В.^{1,2}

1) Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

2) Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^{*}a.zorkina@q.nsu.ru

Отвод тепла на сегодняшний день является актуальной задачей в сфере безопасности и надежности электронных систем, ввиду стремительного развития электроники и её миниатюризации, что привело к возникновению высоких тепловых потоков (до 1 кВт/см²). Наиболее перспективным методом охлаждения высокопроизводительной электроники благодаря возможности достижения высоких коэффициентов теплоотдачи является кипение в микроканалах [1]. В настоящей работе реализован комплексный подход, сочетающий в себе высокоскоростные методы шлирен-визуализации и инфракрасной термографии (рис.1). Рабочий участок представляет две склеенные между собой пластины: боросиликатное стекло с вытравленным каналом высотой 35 мкм и сапфировая пластина с напыленным на нее тонкопленочным ИТО (оксид индий-олова) нагревателем (10 мм x 10 мм). В качестве рабочей жидкости использовалась диэлектрическая HFE 7100. В работе исследованы режимы двухфазного течения при следующих параметрах эксперимента: расход жидкости 2 – 8 мл/мин, регулировался высокоточечным расходомером mini CORI-FLOW Bronkhorst, недогрев жидкости 20 – 40 °С, устанавливался с помощью термостата и теплообменника, расположенного перед входом в канал, и тепловой поток 0 - 24 Вт/см². Проанализированы коэффициенты теплоотдачи, перепады давления на входе и выходе из микроканала, исследована динамика роста паровых пузырей в микроканале при пузырьковом режиме кипения.

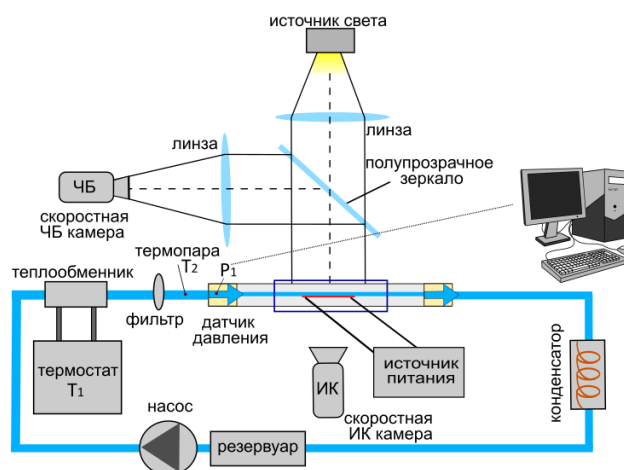


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 24-79-00247, <https://rscf.ru/project/24-79-00247/>)

Литература

1. T.G. Karayiannis, M.M. Mahmoud, Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications, Appl. Therm. Eng. 115 (2017) 1372–1397. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.063.

МЕТОД РАСЧЁТА ВЕРОЯТНОСТИ ЗЕРКАЛЬНОГО ОТРАЖЕНИЯ ВОЛН ОТ ШЕРОХАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Инь Ф.^{1*}, Лю Ш.¹, Хвесюк В.И.¹

1) Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

[*yinfei0426@outlook.com](mailto:yinfei0426@outlook.com)

В работе анализируется перенос тепла в наноплёнках, включающий диффузное и зеркальное рассеяние переносчиков тепла, особо чётко выявляемое в баллистическом режиме течения. Учёт отражения упругих волн от шероховатых поверхностей принципиально важен для расчёта теплопереноса в наноматериалах. Займан [1] ввёл понятие вероятности зеркального отражения волн от случайно шероховатой поверхности p , но его модель учитывала только высоты шероховатостей и нормальные падения волн на поверхности. В данной работе статистически учтены высоты и ширины шероховатостей и любые углы падения волн [2]. В следующих работах не учитывались зависимости p от длин волн и размеров шероховатостей [3].

Предлагается новый метод расчёта p как функции длины волны с учётом характеристик шероховатостей, который позволяет выявлять переход от зеркального к диффузному рассеянию. Мы рассмотрели различные дискретные углы падения и определили критическое значение волнового вектора k_b и критическое значение длины волны $l_b = 2\pi / k_b$, соответствующее переходу от зеркального к диффузному отражению. Мы представили графики зависимости плотности фононных состояний и вероятности зеркального отражения от волнового вектора и длины волны при критической длине $l_b = 5$ нм и сравнили с экспериментом [4].

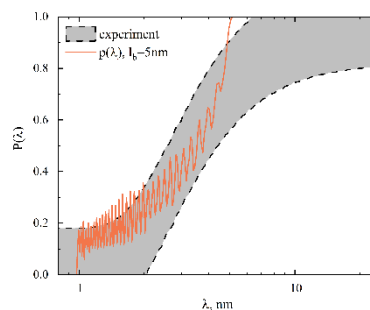


Рис. 1. Вероятность зеркального отражения в зависимости от длины волны для пленки с критической длиной 5 нм.

Наши результаты показывают хорошее согласие с экспериментальными наблюдениями, подтверждая справедливость предлагаемого подхода.

Литература

1. J.M. Ziman, *Electrons and Phonons: The Theory of Transport Phenomena in Solids* // Oxford: Clarendon Press, 2001.
2. Басс, Ф. Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф. Г. Басс, И. М. Фукс. – М. : Рипол Классик, 1972.
3. Maldovan, M. Thermal conductivity of semiconductor nanowires from micro to nano length scales / M. Maldovan // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – Vol. 111. – № 2. – P. 024311.
4. Navaneetha K. Ravichandran, Zhang H., Minnich A.J. Spectrally Resolved Specular Reflections of Thermal Phonons from Atomically Rough Surfaces // *Phys. Rev. X*. 2018. Vol. 8, № 4. P. 041004.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФОНОНОВ В АНИЗОТРОПНОМ ГРАФЕНЕ

Лю Ш.^{1*}, Хвесюк В.И.¹

1) *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

*[*sxliu98@gmail.com](mailto:sxliu98@gmail.com)*

Методы Монте-Карло обладают рядом преимуществ перед подходами, основанными на уравнении переноса Больцмана. Одним из таких преимуществ является возможность получения более детальной информации о кинетических процессах, ответственных за перенос энергии в условиях температурного градиента [1]. Например, можно определить вклад различных фонон-фононных взаимодействий, времена жизни фононов и другие характеристики кинетики теплопереноса. Дисперсионные соотношения графена демонстрируют выраженную анизотропию, особенно в области высоких частот.

В данной работе представлен новый метод расчёта теплопроводности графена, основанный на применении метода Монте-Карло для оценки анизотропных трёхфононных взаимодействий. Дисперсионные соотношения фононов получены с использованием модели силовых постоянных, учитывающей взаимодействия с пятью ближайшими соседями [2]. На рисунке 1 показаны проекции сечений дисперсионных поверхностей в плоскостях, параллельных плоскости графена. Эти кривые не являются круглыми. Это означает, что связь частоты и волновых векторов зависит не только от величин этих векторов, но и от их направлений. Для точного учёта анизотропных эффектов метод Монте-Карло позволяет эффективно выявлять трёхфононные комбинации, удовлетворяющие законам сохранения энергии и импульса, как показано на рисунке 1. Полученные результаты подчёркивают ключевую роль анизотропных фононных взаимодействий в теплопроводности графена.

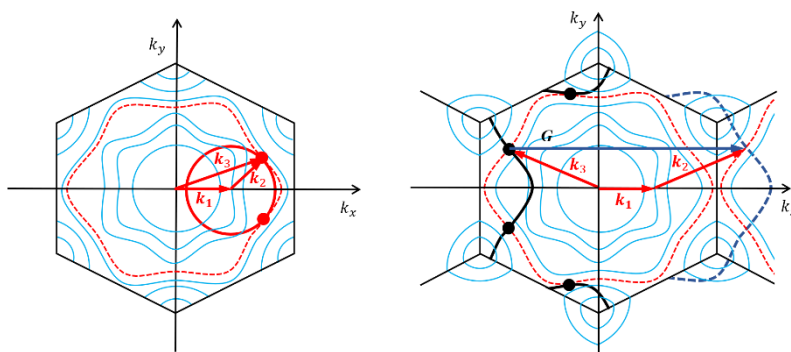


Рис. 1. Принципиальная схема N-процесса и U-процесса.

Расчёты демонстрируют, что метод Монте-Карло с учётом анизотропного взаимодействия фононов позволяет получить значения теплопроводности, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

Литература

1. Liu S., Yin F., Khvesyuk V.I. Investigating Anisotropic Three-Phonon Interactions in Graphene's Thermal Conductivity Using Monte Carlo Method // *Int J Thermophys.* – 2025. – V. 46, – No. 2. P. 22.
2. Mohr M. et al. Phonon dispersion of graphite by inelastic x-ray scattering // *Phys. Rev. B.* – 2007. – V. 76, – No. 3. P. 035439.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ НЕЙРОЭВОЛЮЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА

Лю Ш.^{1*}, Чжан Г.¹, Хвесюк В.И.¹

1) Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

[*sxliu98@gmail.com](mailto:sxliu98@gmail.com)

В современных исследованиях наноматериалов точное определение основного состояния и межатомных сил является ключом к пониманию физических свойств материалов. Наиболее широко для этой цели применяется теория функционала плотности (DFT), однако высокая вычислительная стоимость данного метода существенно ограничивает возможности анализа систем большого размера. В связи с этим нами был использован нейроэволюционный потенциал (NEP), который позволяет значительно сократить затраты вычислительных ресурсов, одновременно обеспечивая точность, сравнимую с результатами DFT, и предлагая эффективный инструмент для моделирования сложных систем.

Вначале нами были проведены расчеты основного состояния для образцов тонких пленок. Для пленок толщиной 1, 2 и 3 нм с применением методов DFT и NEP определялись базовая энергия, межатомные силы и дисперсионные соотношения. Подробный сравнительный анализ показал, что дисперсионные соотношения, полученные с помощью NEP, полностью соответствуют результатам DFT (см. Рис. 1), что подтверждает надежность предлагаемого метода.

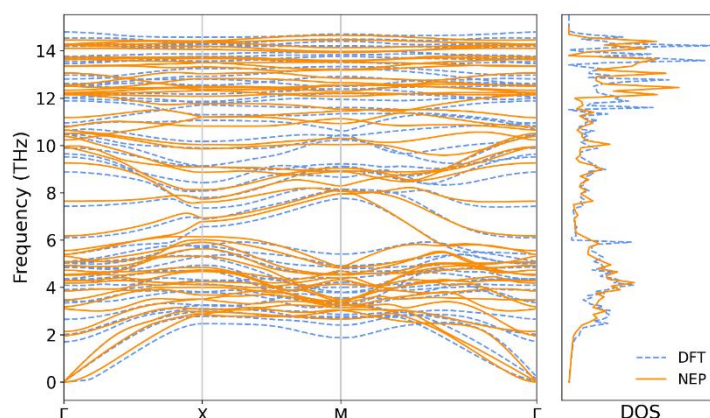


Рис. 1. Дисперсионные соотношения фононов и плотность состояний в кремниевой пленке толщиной 1 нм

На основании результатов валидации NEP был применен для систематического расчета дисперсионных соотношений, плотности состояний и теплоемкости более толстых пленок, что позволило детально проследить зависимость теплоемкости от температуры для пленок различной толщины. Предложенный подход не только существенно снижает вычислительные затраты, но и обеспечивает быстрое и точное выявление эволюции термических свойств в наноструктурах, что имеет важное значение для оптимизации дизайна материалов и их практического применения.

Литература

1. Fan Z. et al. GPUMD: A package for constructing accurate machine-learned potentials and performing highly efficient atomistic simulations // The Journal of Chemical Physics. – 2022. – V. 157, – No. 11. P. 114801.

ВЛИЯНИЕ НЕКОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ НА РОСТ ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ ПРИ КИПЕНИИ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Роньшин Ф.В.^{1*}, Зорькина А.И.¹, Редников А.², Тадрист Л.³, Кабов О.А.¹

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Брюссельский свободный университет, Брюссель, Бельгия*

3) *Университет Экс-Марсель, Марсель, Франция*

[*f.ronshin@gmail.com](mailto:f.ronshin@gmail.com)

Процесс кипения используется во многих промышленных приложениях в системах охлаждения и энергетике. Кипение также широко встречается в природе, например, в гейзерах, вулканах и т.д. Одной из актуальных задач является создание двухфазных систем охлаждения космических аппаратов. Однако, гравитация является одним из основных параметров, характеризующих процесс кипения. Для решения этой задачи была разработана программа исследований кипения в условиях микрогравитации при поддержке Европейского космического агентства. Эксперимент RUBI направлен на исследование динамики роста и теплообмена в области контактной линии одиночного парового пузыря [1].

Данное исследование посвящено результатам эксперимента по кипению одиночного пузырька в большом объеме, с особым вниманием к влиянию различных уровней недогрева жидкости. Экспериментальные результаты, дополненные численными расчетами, позволили детально исследовать динамику роста одиночного парового пузыря. Установлено, что несмотря на тщательную дегазацию рабочей жидкости FC-72, неконденсирующиеся газы препятствуют схлопыванию паровых пузырьков при недогреве. Численное исследование на модифицированной модели позволило изучить термокапиллярную конвекцию (эффект Марангони), индуцируемую наличием неконденсирующихся газов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

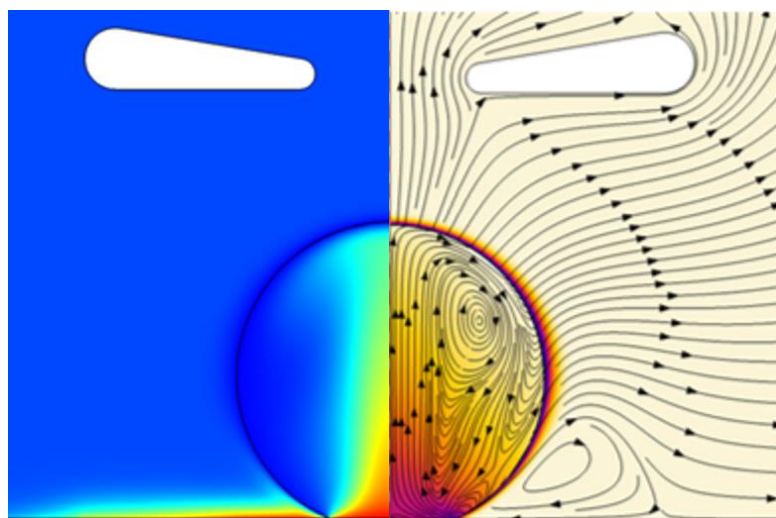


Рис. 1. Термокапиллярная конвекция при росте одиночного парового пузыря в условиях недогрева.

Литература

1. Sielaff A, Mangini D, Kabov O, et al. The multiscale boiling investigation on-board the International Space Station: An overview. Appl Therm Eng. 2022;205:117932.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КАПЛИ И ПУЗЫРЕЙ В КАПЛЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ПАДЕНИИ НА НАГРЕТУЮ ПОДЛОЖКУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Ситников В.О.^{1,2}, Некрут Е.О.^{1,2}, Гатапова Е.Я.^{1,2}

1) Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

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

В рамках данной работы был разработан программный комплекс на основе методов машинного обучения и ИИ, предназначенный для автоматизированного анализа экспериментов. Программа выполняет детекцию падающей капли, отслеживает ее эволюцию в процессе взаимодействия с подложкой, обнаруживает разрывы жидкой пленки и пузыри пара (Рис. 1).

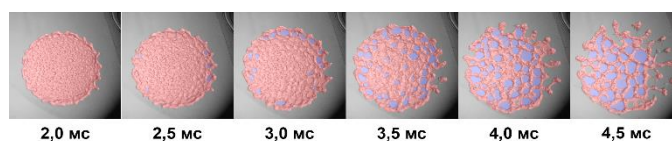


Рис. 1. Пример детекции капли жидкости и возникающих разрывов пленки

Настоящая работа является продолжением исследований, посвященных изучению динамики капли жидкости, падающей на нагретую поверхность [1-3]. В качестве рабочей жидкости применялись вода и диэлектрическая жидкость HFE-7100, температура подложки превышала температуру кипения жидкости, а числа Вебера варьировались в широком диапазоне. Запись экспериментов осуществлялась с помощью высокоскоростной камеры Phantom VEO 410L и стереомикроскопа Альтами. Полученные данные дают возможность построения 3D-графиков и тепловых карт (Рис. 2), которые выполняют роль гистограмм, но учитывают временную эволюцию процессов.

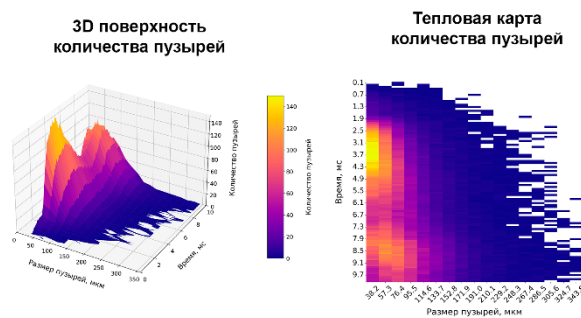


Рис. 2. 3D поверхность и тепловая карты зависимости количества пузырей от времени и размера для воды, $We = 20$ и $T_{\text{подложки}} = 141^\circ\text{C}$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-19-00581 <https://rscf.ru/project/22-19-00581/>).

Литература

1. Gatapova E. Y., et al., Bubble dynamics in thin liquid films and breakup at drop impact //Soft Matter. – 2020. – Т. 16. – №. 46. – С. 10397-10404.
2. Gatapova E. Y., et al., Visualization of drop and bubble dynamics ... //Journal of Flow Visualization and Image Processing. – 2022. – Т. 29. – №. 2.
3. Gatapova E. Y., et al., Boiling regimes of HFE-7100 and water droplets .../International Journal of Thermal Sciences. – 2024. – Т. 206. – С. 109317.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РЕШЕТКИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛЕНОК С РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ

Чжан Г.^{1*}, Лю Ш.¹, Хвесюк В.И.¹

1) Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

[*sxliu98@gmail.com](mailto:sxliu98@gmail.com)

Кристаллы кремния обладают выраженной анизотропией, благодаря чему существует несколько способов выращивания кремниевых плёнок с различной ориентацией. Наиболее широко исследованы три типа ориентировок: (100), (110) и (111) [1]. Их атомные структуры существенно различаются, что влечёт за собой различия в физических и механических свойствах плёнок. В настоящей работе мы провели моделирование и исследование динамики решётки именно для этих трёх типов кремниевых плёнок.

При формировании плёнки на её поверхности образуются «обнажённые» атомы, у которых некоторые связи оказываются разорванными. Такие атомы энергетически неустойчивы и стремятся к образованию новых связей для снижения своей энергии. Данный процесс носит название «реконструкции поверхности» [2]. В рамках настоящего исследования мы провели релаксацию структур с учётом реконструкции, чтобы определить наиболее стабильную конфигурацию поверхности.

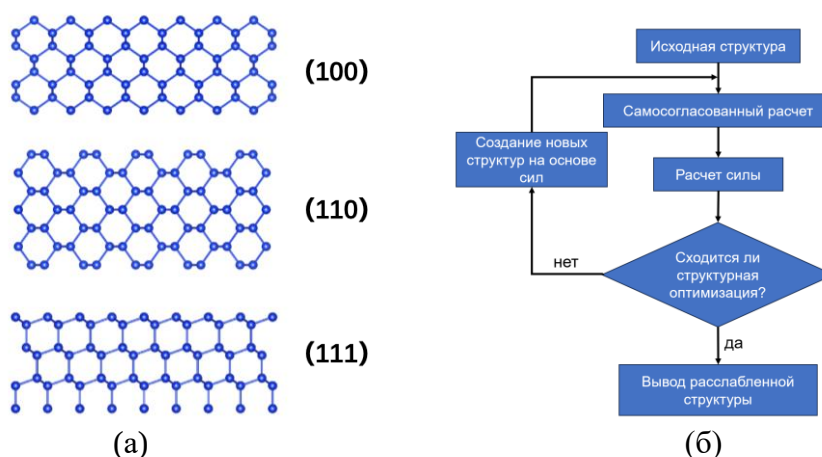


Рис. 1. (а) Боковой вид кремниевых нанопленок с различной ориентацией: (100), (110) и (111); (б) Нахождение окончательной стабильной структуры посредством структурной релаксации

Используя полученные релаксационные структуры, мы рассчитали ключевые характеристики динамики решётки, включая энергию основного состояния, распределение атомных сил, межатомные силовые константы, дисперсионные соотношения фононов, плотность фононных состояний и удельную теплоёмкость. Кроме того, мы разработали набор специализированных программных инструментов для проведения подобных расчётов.

Литература

1. Wu X.-K. et al. Band structure of silicon and germanium thin films based on first principles // Chinese Phys. B. – 2017. – V. 26, – No. 3. P. 037302.
2. Ramstad A., Brocks G., Kelly P.J. Theoretical study of the Si(100) surface reconstruction // Phys. Rev. B. – 1995. – V. 51, – No. 20. P. 14504–14523.

**СЕКЦИЯ 4. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ И ЛУЧИСТЫЙ
ТЕПЛООБМЕН, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ,
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ**

ГОРЕНИЕ БУРОГО УГЛЯ, АНТРАЦИТА И ИХ СМЕСЕЙ В ВОДОКИСЛОРОДНОМ ФЛЮИДЕ

Алехин С.А.^{1*}, Федяева О.Н.¹

1) *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
*[*alehin.as@mail.ru](mailto:alehin.as@mail.ru)*

В условиях устойчивого роста мирового энергопотребления всё большее внимание уделяется разработке технологий, направленных на повышение эффективности сжигания твёрдого топлива и вовлечение в энергетику низкосортных и слабореакционных видов углей – таких как бурый уголь и антрацит. Бурый уголь характеризуется повышенным содержанием кислорода и высокой влажностью, что снижает его теплотворную способность по сравнению с другими видами топлива. Антрацит, напротив, обладает высоким содержанием углерода, но отличается низкой реакционной способностью, что приводит к дополнительным затратам для его воспламенения. Для повышения энергоэффективности сжигания этих углей предлагаются, в частности, использование водо-угольных суспензий [1] и смесевых составов углей [2]. В первом случае добавление воды интенсифицирует горение за счёт генерации радикалов OH, H и HO₂. Во втором – тепло, выделяющееся при сгорании более реакционного компонента, способствует воспламенению менее активного. В настоящем исследовании оба этих подхода применяются для изучения особенностей горения бурого угля, антрацита и их смесей в водокислородном флюиде.

Цель данной работы – выявление особенностей горения бурого угля, антрацита и их смесевых составов в водокислородном флюиде высокого давления. Эксперименты проведены в трубчатом реакторе автоклавного типа, оснащённом внутренней Pt-Rh/Pt термопарой. В экспериментах использованы смеси следующих массовых составов: 1:1, 1:3 и 3:1. Размер частиц обоих углей не превышал 50 мкм. Проведено сравнение горения бурого угля и антрацита в водокислородном флюиде с результатами их термогравиметрического анализа в потоке воздуха.

Установлено, что наличие паров воды и высокая плотность кислорода снижают температуру воспламенения бурого угля и антрацита по сравнению с окислением в потоке воздуха. Особенно заметное снижение температуры воспламенения (примерно на 270 °C) наблюдается для антрацита, что свидетельствует о возможности повышения его реакционной способности при определённых условиях. Смеси бурого угля и антрацита демонстрируют различное поведение в зависимости от их соотношения. При 70%-ном содержании бурого угля тепловыделение при его окислении достаточно для инициирования воспламенения антрацита. При этом вся смесь сгорает в температурном интервале, характерном для бурого угля. Полученные результаты указывают на возможность совместного использования углей разных марок для улучшения характеристик их горения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке департамента инвестиций, потребительского рынка, инноваций и предпринимательства мэрии г. Новосибирска.

Литература

1. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions // Fuel. – 2011. – V. 90, pp. 865–877.
2. Wang C., Liu Y., Zhang X., Che D. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in northwestern China // Energy & Fuels. – 2011. – V. 25, pp. 3634–3645.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАЖИГАНИЯ ОБРАЗЦОВ ЭЛЕКТРОДНОГО УГЛЯ ЛУЧИСТЫМ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ

Архипов В.А., Басалаев С.А.*, Кузнецов В.Т., Перфильева К.Г.

Томский государственный университет, Томск, Россия

*[*tarm@niipmm.tsu.ru](mailto:tarm@niipmm.tsu.ru)*

В настоящее время использование гетерогенной модели для анализа процессов нагрева и зажигания твердых горючих в среде воздуха или другого газообразного окислителя осложняется отсутствием надежных методов для оценки кинетики поверхностных реакций. Сложность получения кинетических констант гетерогенных реакций обусловлена необходимостью выделения в эксперименте чисто кинетической области, в которой экзотермическая химическая реакция, приводящая к зажиганию, идет на поверхности раздела воздуха и горючего. Применение оптических печей и лазерных источников излучения в исследованиях зажигания твердых горючих позволяет получить данные, которые помогают уточнить механизм зажигания и перехода к стационарному горению.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса зажигания электродного угля под воздействием теплового излучения. Этот метод основан на подходе, предложенном Вилуновым В.Н. [1]. В экспериментах использовались образцы электродного угля, поскольку этот тип горючего характеризуется высокой температурой плавления и кипения, а также способностью к окислению на поверхности без формирования окисной пленки. Это позволяет рассматривать электродный уголь как эталонный материал для оценки корректности предложенной методики определения кинетических параметров на основе гетерогенной модели зажигания с использованием обратной задачи химической кинетики. Наряду с этим, исследование закономерностей зажигания образцов электродного угля и определение для него констант формальной кинетики имеет большое практическое значение в связи с широким использованием различных марок угля в качестве топлива в теплоэнергетике.

Исследования проводились на экспериментальной установке, состоящей из печи радиационного нагрева «УРАН-1» и замкнутой камеры с кварцевыми окнами объемом 0.5 дм³ установленной в фокальной плоскости оптической печи. Эксперименты проводились в кислородной среде.

Получены экспериментальные данные по влиянию плотности лучистого теплового потока в диапазоне от 75 до 250 Вт/см² и давления окружающей среды для 0.1 и 1.1 МПа на время задержки зажигания образцов электродного угля. На основе полученных данных из решения обратной задачи химической кинетики были определены кинетические константы процесса (энергия активации и предэкспонент) в рамках гетерогенной модели зажигания. Полученные результаты обсуждены с позиций низкотемпературного режима горения угля [2].

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

Литература

1. Vilyunov V.N., Zarko V.E. Ignition of Solids. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier. – 1989.
2. Гремячкин В.М. Гетерогенное горение частиц твердых топлив. Москва: Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана. – 2015.

МЕТАЛЛОГИДРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Бездудный А.В.^{1*}, Дуников Д.О.^{1,2}, Блинов Д.В.^{1,2}

1) Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

2) Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Эффективное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) приобретает всё больший приоритет в мировом развитии энергетики и системы накопления энергии стали решением, обеспечивающим стабильность работы установок на базе ВИЭ [1,2]. Металлогидриды (МГ) могут быть использованы как для хранения и очистки водорода, так и для хранения тепловой энергии (ХТЭ) [3].

Мы представляем результаты экспериментальных исследований тепло- и массообмена, а также динамики процессов в одноступенчатой системе хранения тепловой энергии на базе МГ-технологии, основанной на металлогидридном реакторе с 5 кг сплава $\text{LaNi}_{4.8}\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{0.1}$ [4]. Продемонстрирована циклически стабильная работа установки в диапазоне температур -10 до +90°C.

Характеристики системы анализировались с точки зрения энергетической и эксергетической эффективности. Основными препятствиями являются тепловые потери на нагрев корпуса реактора и необходимость использования легкого и эффективного теплообменника, т.е. динамика реакции и производительность системы могут быть значительно улучшены за счет снижения теплового сопротивления и балластной тепловой массы реактора. Кроме того, скорость потока теплоносителя в обменнике должна поддерживаться достаточно низкой для обеспечения минимально возможной разницы между температурами засыпки МГ и теплоносителя.

Наши результаты показывают, что низкотемпературные гидриды металлов типа LaNi_5 могут быть использованы в системах хранения тепловой энергии. Тем не менее, их рабочие температуры ниже 100°C, поэтому основные приложения должны быть ориентированы на климат, например, пусковые МГ-устройства для холодной погоды или системы "поддержания тепла". Например, это может быть система обогрева топливного элемента в режиме ожидания, которая использует прямой теплообмен через тепловые трубы между топливным элементом и МГ-реактором. Обогрев может осуществляться без использования внешней энергии, а только за счет энергии экзотермической реакции от термически связанного МГ-реактора, постепенно заряжаемого водородом из газового баллона.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 25-19-00696).

Литература

1. Kenisarin, M.M., High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. 14(3): p. 955-970.
2. Б.Д. Бабаев. Принципы теплового аккумулирования и используемые теплоаккумулирующие материалы // *Теплофизика высоких температур*, 2014, том 52, № 5, с. 760–776
3. Reiser A, Begdavonic B, Schliche K. The application of Mg based metal hydrides as heat energy storage systems. *Int J Hydrogen Energy*, May 2000, p. 425-430
4. Borzenko, V.I., et al., Hydrogen sorption properties of metal hydride beds: Effect of internal stresses caused by reactor geometry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019. 44(12): p. 6086-6092.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРАХ

Буряковская О.А.^{1*}, Тарасенко А.Б.¹, Кочегарова А.В.^{1,2}, Сулейманов М.Ж.^{1,2},
Балабаев Н.Е.¹, Шавелкин М.А.^{1,2}, Беляев И.А.^{1,2}

1) Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

2) Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

* osminojishe@yandex.ru

Для безопасной эксплуатации литий-ионных аккумуляторов и батарей на их основе и увеличения их срока службы существенную важность имеет учет влияния тепловых процессов [1]. В процессе работы возможно наличие как необратимого, так и обратимого тепловыделения в аккумуляторе [2], при этом последнее способно на несколько градусов изменять температуру аккумулятора. Актуальность проблемы обусловлена широким распространением литий-ионных аккумуляторов.

Разработан программно-аппаратный измерительный комплекс для автоматизированной регистрации физических величин и их обработки, предназначенный для работы с аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП), использующими для обмена данными протокол Modbus (RTU/ASCII или TCP), а также обработки результатов измерений. Программа позволяет выполнять функции трех различных программных приложений, предоставляемых производителем (на примере компании ОВЕН [3]): «Конфигуратор M110» для АЦП типа MB110, «OWEN Configurator» для АЦП типа MB210 и «График ОВЕН МСД200» для регистраторов МСД200.

Разработанный комплекс используется для оценки распределения температуры по поверхности литий-ионных аккумуляторов в процессе их заряда и разряда, при этом осуществляется взаимодействие с модулями аналогового ввода ОВЕН MB210-101 (измерение температур) и ОВЕН MB110-224.2АС (измерение тока и напряжения аккумуляторов).

Получены распределения температур по поверхности цилиндрического аккумулятора системы $\text{LiC}_6\|\text{LiFePO}_4$ синхронно с измерениями тока и напряжения для сопоставления тепловых и электрохимических процессов. Показана неоднородность распределения температур по разным участкам поверхности, а также реализация как экзо-, так и эндотермических процессов при работе аккумулятора, при этом за счёт повышенной точности измерений подобные явления наблюдаются даже при малых рабочих токах. При повышении силы рабочего тока эндотермические участки начинают сглаживаться, поскольку именно тепловыделение за счёт потерь на внутреннем сопротивлении начинают доминировать в тепловом балансе аккумулятора.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00269-25-00).

Литература

1. Kim J., Oh J., Lee H., Review on battery thermal management system for electric vehicles//Appl.Therm.Eng. (2019), 149, pp. 192–212;
2. Bedürftig B., Oldenburger M., Hüfner T., Richter E., Braatz R.D., Gruhle A., Findeisen R., Measuring the reversible heat of lithium-ion cells via current pulses for modeling of temperature dynamics//Journal of Power Sources 506 (2021) 230110;
3. Web-сайт компании «ОВЕН» [Электронный ресурс] URL: <https://owen.ru> (дата обращения 12.04.2025 г.).

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В МЕТАЛЛОГИДРИДНОЙ СИСТЕМЕ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ H2SMART

Казаков А.Н.^{1*}, Блинов Д.В.^{1,2}, Бездудный А.В.¹, Еронин А.А.¹, Дуников Д.О.^{1,2}

1) Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

2) Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

* kazakoffalex09@gmail.com

Водородные топливные элементы (ТЭ) с протонообменной мембраной обладают большим потенциалом в автономных системах энергообеспечения малой мощности благодаря высокой плотности и эффективности преобразования энергии, низких рабочих температур и экологичности [1]. Создание энергоустановок на базе ТЭ требует разработки эффективных систем хранения водорода и интеграции отдельных компонентов в единую систему. Использование металлгидридных материалов (МГ), способных селективно и обратимо поглощать водород и хранить в твердофазном состоянии, позволяет обеспечить повышенную безопасность при эксплуатации [2]. Водород в МГ поглощается с отводом тепла и выделяется при нагреве, причем большой тепловой эффект реакции сорбции обеспечивает довольно сильную зависимость равновесного давления водорода от температуры [3, 4]. Таким образом, процессы поглощения и выделения водорода можно провести за счет использования сбросного низкопотенциального тепла в ТЭ и электролизере. Поскольку ИМС избирательно поглощают только водород, в циклическом процессе сорбции/десорбции осуществляется очистка водорода от примесей. Для низкотемпературных металлгидридов АВ₅ типа весовое содержание водорода в металлгидридах относительно невелико (1-2%), но объемная плотность (более 75 кг Н₂/м³) превышает плотность жидкого водорода.

В данной работе представлены результаты исследований влияния дополнительного охлаждения в виде термоэлектрического преобразователя (элемент Пельтье) на процесс сорбции водорода в МГ реакторе экспериментальной энергоустановки H2SMART. Показано, что при отсутствии дополнительного охлаждения температура в МГ повышается, что приводит к остановке сорбции водорода.

Использование элемента Пельтье позволило увеличить более чем в 10 раз абсорбируемый объем водорода в металлгидридный реактор при зарядке от электролизера.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 25-19-00696).

Литература

1. E.I. Zoulias, N Lymberopoulos Hydrogen-based autonomous power systems: techno-economic analysis of the integration of hydrogen in autonomous power systems // Springer. - 2008.
2. Б.П. Тарасов, В.В. Бурнашева, М.В. Лотоцкий, В.А. Яртысь Методы хранения водорода и возможности использования металлгидридов // -Альтернативная энергетика и экология. 2005. Т. 12. с. 14–37.
3. G. Sandrock A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view // - J. of Alloys and Compounds. 1999. Vol. 295, pp. 877–888.
4. D.W. Sun, S.J. Deng A Theoretical Model Predicting the Effective Thermal Conductivity in Powdered Metal Hydride Beds // - Int. J. of Hydrogen Energy. 1990. Vol. 15. pp. 331-336.

ГЕНЕРАЦИЯ И ПЕРЕНОС ГОРЯЩИХ ЧАСТИЦ ВО ВРЕМЯ КРУПНЫХ ПОЖАРОВ: ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Касымов Д.П.^{1*}, Агафонцев М.В.¹, Матвиенко О.В.^{1,2}, Лобода Ю.А.¹,
Луценко А.В.¹, Мартынов П.С.³, Рейно В.В.³

1) Томский государственный университет, Томск, Россия

2) Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

*3) Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
Новосибирск, Россия*

**kdp@mail.tsu.ru*

Существует множество математических моделей лесных пожаров, но лишь немногие из них учитывают вклад горящих и тлеющих частиц, образующихся в зоне горения, которые являются одной из основных причин распространения пожаров по всему миру [1, 2].

В работе представлена математическая модель, описывающая процессы теплообмена и зажигания слоя древесины с одиночной частицей природного происхождения, а также группой частиц, которая позволяет определить характеристики теплообмена и рассчитывать времена зажигания. Структура течения моделировалась в предположении, что движение воздуха у поверхности происходит в ламинарном режиме, а влияние продуктов пиролиза и испаряющейся воды, поступающих в газовую фазу, на структуру течения пренебрежимо мало.

Получены следующие основные результаты:

- Критический объем поджигающей частицы зависит от соотношения длин ее сторон и ориентации частицы по потоку. Для частиц, ориентированных вдоль потока, величина критического объема выше, чем для частиц, ориентированных поперек потока.

- Моделирование взаимодействия группы частиц с образцом древесины показало, что в низкотемпературном режиме теплообмена эволюция температурного профиля определяется влиянием только ближайшей частицы.

- Получена зависимость критического времени зажигания слоя древесины в зависимости от размеров частиц, а также расстояния между ними. С уменьшением размеров частиц зажигание древесины возможно при уменьшении расстояния между частицами.

- Для верификации модели проведена серия лабораторных экспериментов по определению вероятности и условий воспламенения древесных строительных материалов от частиц природного происхождения. Получено хорошее согласование результатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 24-71-10029, <https://rscf.ru/project/24-71-10029/>).

Литература

1. Koo E., Rodman R., Linn P.J., Pagni C.B. Modelling firebrand transport in wildfires using HIGRAD/FIRETEC. // Int. J. Wildland Fire. – 2012. – V. 21. – P. 396–417.
2. Bearinger E., Lattimer B.Y., Hodges J.L., Rippe C., Kapahi A. Statistical Assessment of Parameters Affecting Firebrand Pile Heat Transfer to Surfaces // Front. Mech. Eng. – 2021. – V. 7. – P 702181.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАПЕЛЬ АЭРОЗОЛЯ С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ УГЛЯ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

Клименко А.¹, Исламова А.Г.¹, Шуляев С.А.¹, Шлегель Н.Е.¹

1) Томский политехнический университет, Томск, Россия

*ayk40@tpu.ru

На сегодняшний день в области исследований процессов столкновения капель и частиц в газовой среде при нормальных условиях (давлении и температуре) получен большой объём экспериментальных данных [1,2]. Такие исследования достаточно репрезентативны, так как не требуют привлечения дополнительного дорогостоящего оборудования для создания высоких температур и давления внешней среды. Однако в реальных технологических установках упомянутые параметры могут значительно отличаться от нормальных условий. Целью настоящей работы являлось определение характеристик процесса взаимодействия при соударении капель воды с частицами угля в аэрозольном потоке при варьировании температуры газовой среды. Методика проведения экспериментальных исследований подробно рассмотрена в работе [2]. На рисунке 1 представлена режимная карта, учитывающая линейный параметр взаимодействия (B) и числа Вебера (We). Установлено, что режим агломерации протекает при малом отношении размеров капли к размерам частицы (≤ 0.3) и малых скоростях взаимодействия капель и частиц (≤ 1 м/с).

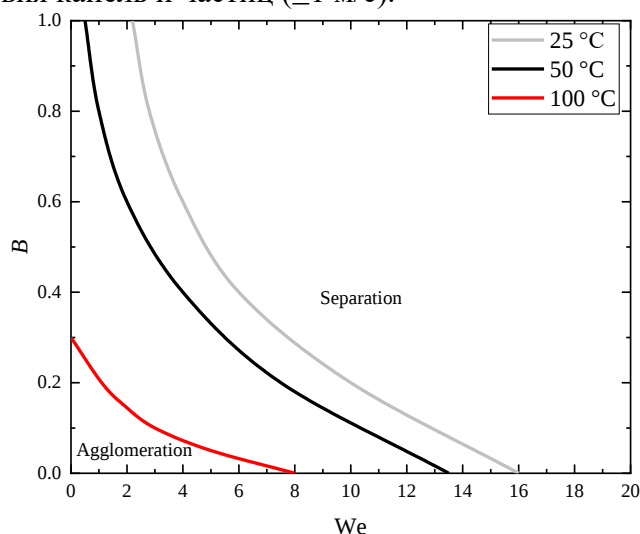


Рис. 1. Карты режимов соударений капель жидкости с твердыми частицами при варьировании температуры окружающей среды

Показано, что с увеличением температуры область возникновения режима дробления возрастает, что объясняется изменением реологических свойств жидкости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-71-10040, <https://rscf.ru/project/23-71-10040/>).

Литература

1. Gac J.M., Gradon L. Lattice-Boltzmann modeling of collisions between droplets and particles // Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Asp. – 2014. – V. 5, p. 100382.
2. Islamova A.G., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Influence of collision conditions between aerosol flows of liquid droplets and solid particles typical for wet vortex dust collectors // Energy – 2024. – V. 298, p. 131373.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛАПСА ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ КАК МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА С ВОДОЙ ПРИ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Коновалов О.И.^{1*}; Мелихов В.И.¹

1) НИУ «МЭИ», Москва, Россия

[*KononovOI@mpei.ru](mailto:KononovOI@mpei.ru)

Необходимыми условиями возникновения парового взрыва является образование хорошо перемешанной системы высокотемпературного расплава с водой ($t_{\text{расплава}} \gg t_{\text{sat}}$) и контакт воды с поверхностью расплава [1]. При стратифицированной конфигурации сверху расплава находится недогретая до температуры кипения вода, при этом охлаждение поверхности расплава происходит в режиме пленочного кипения. Паровая пленка оттесняет недогретую жидкость от поверхности расплава. Контакт расплава с водой может возникнуть в результате удара кумулятивных струек жидкости, образующихся при коллапсе паровых пузырьков, попадающих в холодную жидкость над поверхностью расплава [1,2]. Толщина паровой пленки оказывает влияние на динамику схлопывания паровых пузырьков. В случае тонкой пленки коллапсирующий пузырек движется в сторону поверхности расплава и струйка жидкости бьет по ней, а при относительно большой толщине пленки пузырек движется в сторону от поверхности расплава.

Проведены исследования влияния характеристик паровой пленки на динамику коллапса паровых пузырьков. В результате построена диаграмма $\rho_2 - d$, где $\rho_2 = \rho_{\text{пар}} / \rho_{\text{вода}}$, $d = l_{\text{толщина}} / R_{\text{макс.пузырь}}$. Установлено, что при $\rho_2 > 0,03$ и малой толщине паровой пленки возможен коллапс пузырька с генерацией кумулятивных струек. Был проведен анализ динамики сжатия и миграции пузырька, а также деформации паровой пленки с помощью CFD-кода FlowVision. Получено, что в условиях приближенным к тяжелым авариям на АЭС (давление 1–5 бар, толстая паровая пленка) не происходит коллапса парового пузырька с генерацией кумулятивной струи жидкости, направленной к поверхности расплава. Также получено, что в процессе коллапса (сжатия) парового пузырька паровая пленка деформируется в результате межфазного трения при движении жидкости, направленном в центр-масс пузырька. Высота деформации L , отнесенная к толщине пленки h , зависит от расстояния пузырька от поверхности D и радиуса пузырька r , $L/h = Ce^{-A \cdot D/r}$. При стремлении пленки уменьшить кривизну поверхности возможно образование желоба с радиусом кривизны равным толщине пленки, что приведет к контакту расплава с водой – необходимому условию возникновения парового взрыва.

Литература

1. Мелихов В.И. Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов/ Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е.// — М.: Издательство «ИПМех РАН», 2020. 276 с. ISBN 978-5-91741-259-7П.
2. Kudinov P. Premixing and steam explosion phenomena in the tests with stratified melt-coolant configuration and binary oxidic melt simulant materials/ Kudinov P., Grishchenko D., Kononov A., Karbojian A.// Nuclear Engineering and Design, 314, 2017, –P. 182-197.
3. Melikhov V.I. Evaluation of energy and impulse generated by superheated steam bubble collapse in subcooled water/ Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E., Le.T.C.// Nuclear Engineering and Design, vol. 366, 2020, –P. 13.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО АГРЕГАТА В СВЯЗАННОЙ ПОСТАНОВКЕ

Модорский В.Я.¹, Калюлин С.Л.^{1*}, Владимиров Н.В.¹,
Черепанов И.Е.¹, Серегина М.А.¹, Бабушкина А.В.¹

1) Пермский национальный исследовательский политехнический университет
(ПНИПУ), Пермь, Россия

^{*}ksl@pstu.ru

Целью настоящей работы является разработка расчетной модели и методики численной оценки распределения тепла в электронном агрегате транспортной системы, заполненном водородом, в динамической связанной трехмерной постановке сопряженного теплообмена в условиях внешнего обтекания воздухом.

Математическая модель для численных расчетов аэродинамики снаружи электронного агрегата и газодинамики внутри него базируется на системе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса [1], замыкаемой уравнениями состояния идеального сжимаемого газа со свойствами воздуха, моделью турбулентности, а также начальными и граничными условиями. Математическая модель для численных расчетов теплового состояния агрегата основана на уравнении теплопроводности [2].

Обе математические модели решаются в связанной постановке, благодаря чему реализуется модель сопряженного теплообмена между воздухом снаружи и водородом внутри электронного агрегата через его твердотельную конструкцию с заданными теплофизическими характеристиками для материалов конструкции: теплоемкостью, теплопроводностью и плотностью для различных значений температур.

Распределение рассеиваемой мощности платами электронного агрегата задавалось в качестве граничных условий теплового потока на стенках тепловыделяющих элементов. Получены поля распределения температур в различных сечениях электронного агрегата (рис. 1).

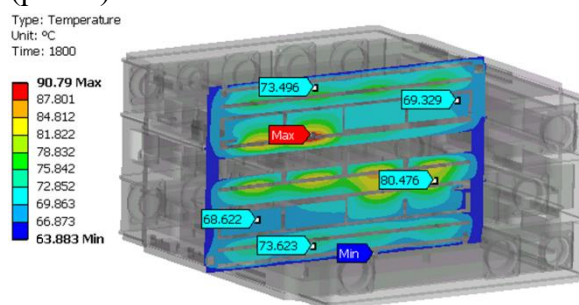


Рис. 1. Поля распределения температуры в сечении теплового агрегата.

Реализация алгоритма выполнена в имеющемся у ПНИПУ лицензионном программном комплексе ANSYS. В качестве аппаратного обеспечения использовались ресурсы высокопроизводительного вычислительного комплекса ПНИПУ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, проект FSNM-2023-0004.

Литература

1. G.G. Stokes. On Some Cases of Fluid Motion // Mathematical and Physical Papers by George Gabriel Stokes. – 1880. – pp. 17-68.
2. J. Crank, P. Nicolson. A Practical Method for Numerical Evaluation of Solutions of Partial Differential Equations of the Heat-Conduction Type // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. – 1947. – Vol. 43. – No. 1. – pp. 50-67.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ В ПИЛОТНОЙ УСТАНОВКЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭНЕРГЕТИКЕ

Никитин А.Д.¹, Абаимов Н.А.^{1*}, Ершов М.И.¹, Касилин Я.В.¹, Тупоногов В.Г.¹,
Осипов П.В.¹, Богатова Т.Ф.¹, Плотников Л.В.¹, Симбирягин Л.В.², Алексеенко С.В.^{1,3},
Рыжков А.Ф.¹

1) Лаборатория Новых энергетических технологий, Уральский федеральный
университет, Екатеринбург, Россия

2) ООО “Промышленный перлит”, Екатеринбург, Россия

3) Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
*nick.sum41@mail.ru

Проблема использования углеродно-нейтральных топлив, таких как биомасса, становится всё острее из-за ужесточающихся экологических требований. Высокая влажность, низкая теплота сгорания, широкий фракционный состав, относительно низкая температура плавления золы, высокое содержание смол являются основными трудностями для применения биомассы в энергетике. Преодолеть вышеописанные трудности можно с использованием особого гидродинамического режима – поточно-фонтанирующего. Данный режим позволяет на воздушном дутье газифицировать сырую биомассу широкого фракционного состава с получением синтез-газа энергетического назначения. Цель работы – исследование воздушной газификации сырой биомассы широкого фракционного состава в пилотной установке.

В 2023, 2024 годах проведена серия экспериментов на пилотной установке поточной газификации биомассы с производительностью по топливу 5–30 кг/ч. Газификатор имеет нижний ввод первичного воздуха и включает нижние конический и цилиндрический участки, верхний конический и цилиндрический участки. Топливо и вторичный воздух подаются либо в нижний, либо в верхний цилиндрический участок в разных конфигурациях. Установка работает при атмосферном давлении. В качестве топлива используется сырой сосновый опил с влажностью 5–18%, средним размером 0,25–0,5 мм и максимальным 5–6 мм. Каждый пуск длится от 2 до 4 часов.

Температура, давление и состав синтез-газа замеряются как на выходе из установки, так и по глубине реакционной камеры. Температура измеряется с помощью хромель-алюмелевых термопар, давление – цифровых дифференциальных датчиков Keller PD-33X, а состав синтез-газа – газоанализатора «Гамма-100».

При коэффициенте расхода окислителя (α) 0,14–0,27 состав синтез-газа варьируется в следующих диапазонах: $H_2=5\text{--}9\%$, $CO=11\text{--}21\%$, $CO_2=14\text{--}16\%$, $CH_4=1\text{--}7\%$, $H_2/CO=0,21\text{--}0,47$. Синтез-газ, полученный во всех режимах, удовлетворяет требованиям по минимальной теплоте сгорания газовых турбин (2,51–5,58 МДж/м³), что говорит о его применимости для энергетических назначений. КПД холодного газа (хим. КПД) в наиболее эффективном режиме достигает 63%, что является хорошим показателем для поточных газификаторов сырой биомассы.

Полученные экспериментальные данные и апробированные методики измерений используются для отработки режимов подачи воздуха и биомассы, а также для разработки конструкции промышленных газификаторов.

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

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРХОВОГО ТОРФА И ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД

Попов А.Н.^{1*}, Любов В.К.¹, Алексеев П.Д.¹

1) Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
Архангельск, Россия

*a.n.popov@narfu.ru

Комплексное развитие городов и поселений приарктических территорий, освоение новых территорий на крайнем Севере, создание производств полного цикла требует внедрения процесса утилизации образующихся побочных продуктов и использования местных энергетических ресурсов. Значительная территория арктической зоны Российской Федерации покрыта торфяными болотами, являющимися источниками важного сырья для производства тепловой и электрической энергии. Особенно актуальным вопрос использования торфа становится для удаленных от месторождений углеводородов потребителей, тем более для которых затруднен завоз топлива в связи с сезонностью доставки, в частности из-за наличия зимников и замерзающих портов.

В данной работе выполнен комплексный анализ свойств верхового торфа месторождения «Большой Калтус 1» и осадка сточных вод (ОСВ) Архангельского целлюлозно-бумажного комбината. Для проводимых исследований использовались современные методики и лабораторное оборудование научных центров Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. В частности, теплофизические свойства получены с использованием метода лазерной вспышки ($\alpha=0,09\div0,13$ мм²/с для торфа и $\alpha=0,08\div0,11$ мм²/с для ОСВ) и метода монотонного нагрева. Теплотехнические свойства определены на основе методов термического анализа, удельная теплота сгорания определена путем сжигания навесок в калориметрической бомбе ($Q_i^{daf}=19790$ кДж/кг для торфа и $Q_i^{daf}=21420$ кДж/кг для ОСВ). Химические свойства и элементный состав определен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии, содержание органических неметаллов определялось на анализаторе элементного состава.

Результаты, полученные в работе, позволяют уточнить схему процесса горения частицы торфа и осадка сточных вод, для которой необходимо описать математически предварительные стадии процесса термического разложения. При расчете процесса сушки будет использована теплопроводность частицы, при расчете конвективной составляющей коэффициента теплоотдачи для нахождения критерия Нуссельта, расчета лучистого теплообмена, а также для дифференциального уравнения теплопроводности использованы актуальные значения температуропроводности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSRU-2024-0007.

Литература

1. Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P., Abbott G. L. (1961) J. Appl. Phys., vol. 32, no. 9, pp. 1679 - 1684. doi:10.1063/1.1728417
2. Архангельская, Т.А. Температуропроводность почвенно-торфяных смесей: нелинейная зависимость от содержания торфа / Т.А. Архангельская, Е.В. Телятникова, А.Б. Умарова // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2024. – Т. 79, № 4. – С. 105-113. – DOI 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-105-113

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РСТ-ИЗОТЕРМ МЕТАЛЛОГИДРИДОВ

Романов И.А.^{1*}, Дуников Д.О.^{1,2}, Еронин А.А.¹, Казаков А.Н.¹

1) Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

2) Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

[*romanoff_i_a@mail.ru](mailto:romanoff_i_a@mail.ru)

Поиск и изучения новых перспективных материалов для водородной энергетики по-прежнему является актуальной задачей. Измерение изотерм абсорбции и десорбции водорода (РСТ-изотерм) являются обязательным для характеристики материалов-поглотителей водорода.

Наиболее распространённым методом измерения РСТ-изотерм является метод Сивертса, благодаря своей простоте, доступности и широкому диапазону применимости [1]. Он представляет собой манометрический метод, в котором количество абсорбированного водорода определяется косвенно за счет измерения падения давления водорода над образцом в системе с фиксированным известным объемом; измерение десорбции, в свою очередь, связано с определением повышения давления над образцом [2].

Одним из недостатков метода Сивертса является накопление погрешности по мере измерения РСТ-изотермы [3]: для расчета каждой точки на изотерме необходимо провести две серии измерений, и равновесное значение давления и температуры в предыдущей точке является стартовым для точки следующей. Метод Сивертса является квазиравновесным, то есть в процессе измерения РСТ-изотермы температура и давление водорода над образцом могут значительно изменяться, а фиксируются только исходные и равновесные значения. В классическом методе Сивертса процесс абсорбции/десорбции водорода запускается с помощью повышения/понижения давления водорода над образцом при подаче/отборе калиброванной порции газа. Однако процесс абсорбции/десорбции можно запустить только за счёт изменения температуры сосуда с образцом, поскольку давление газообразного водорода слабее зависит от температуры, чем равновесное давление.

В данной работе представлено описание и результаты использования модифицированной методики для измерения РСТ-изотерм интерметаллического соединения (ИМС) АВ₅-типа состава LaNi_{4.8}Al_{0.2} при температурах 313, 333 и 353 К в сравнении с измерениями, проведёнными классическим способом, которое показало незначительное различие в рассчитанной из экспериментальных данных величине равновесного давления, энтальпии и энтропии абсорбции и десорбции водорода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 25-19-00696, <https://rscf.ru/project/25-19-00696/>)

Литература

1. T.P. Blach, E.M. Gray, "Sieverts apparatus and methodology for accurate determination of hydrogen uptake by light-atom hosts", Journal of Alloys and Compounds, vol. 446–447, p. 692-697, (2007).
2. D.P. Broom, "The accuracy of hydrogen sorption measurements on potential storage materials", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 32, p. 4871 – 4888, (2007).
3. C.J. Webb, E.MacA. Gray "Analysis of the uncertainties in gas uptake measurements using the Sieverts method" International Journal of Hydrogen Energy, vol. 36, p. 366 – 375, (2014).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВЛЕНИЯ ГАЗОВ РАЗБАВИТЕЛЕЙ И ОКИСЛИТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В СТРУЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

Садкин И.С.^{1*}, Копьев Е.П.¹, Шадрин Е.Ю.¹

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

^{}sadkinvanya@mail.ru*

При производстве продукции зачастую накапливается значительное количество углеводородных отходов, которые потенциально могут быть использованы в качестве дополнительного источника энергии, что позволит уменьшить издержки на их утилизацию, и снизит себестоимость продукции за счет получения дешевой энергии. Для газообразных отходов возможно применение стандартных решений и устройств, используемых в газовом оборудовании. Для твердых непроектных топлив распространено слоевое сжигание. Однако при использовании жидких углеводородных отходов необходимо применение специальных подходов, так как это жидкости с переменным фракционным составом, содержанием механических примесей и воды. Традиционные способы не обеспечивают высокую эффективность и безопасность сжигания такого топлива и требуют применения дополнительных решений.

Основной параметр, который обеспечивает высокую полноту сжигания жидкого топлива, является качественное распыление. Хорошее распыление приводит к лучшему смешиванию воздуха с топливом, что обеспечивает более полное сгорание и снижение выбросов монооксида углерода, несгоревших углеводородов и др. В ИТ СО РАН предложен метод сжигания непроектных жидких углеводородных топлив, заключающийся в распылении струей перегретого водяного пара. Объединение подходов распыления топлива струей перегретого водяного пара с повышенным содержанием кислорода или разбавлением дымовыми газами с использованием камеры газогенерации является перспективным способом сжигания жидких непроектных топлив с пониженным уровнем вредных выбросов.

Для развития представлений о закономерностях физико-химических процессов при сжигании жидких углеводородов в условиях подачи газов окислителей-разбавителей в рамках настоящей работы проведено экспериментальное исследование экологических и теплотехнических показателей горения жидких углеводородов при распыле струей перегретого водяного пара в камеру газогенерации горелочного устройства с варьированием содержания разбавителей (дымовых газов) и окислителя (кислорода). Получено, что при распыле топлива перегретым водяным паром добавление разбавителей позволяет дополнительно снизить удельные выбросы оксидов азота (менее 40 мг/кВт·ч для дизельного топлива), а повышение концентрации кислорода ведет к их увеличению. Анализ теплового баланса режима газификации и частичного сгорания топлива в камере газогенерации показал, что при подаче воздуха в камеру газогенерации с избытком 0.3 и добавлением разбавителей сгорает 19% топлива. Без добавления разбавителей доля воспламеняемого топлива в камере резко увеличивается до 26%. При отношении окислителя к газам-разбавителям 1:2 сгорает 29% топлива, при отношении 1:1 наблюдается практически полное сгорание.

В результате получено, что объединение подходов распыления топлива струей перегретого водяного пара с разбавлением дымовыми газами с использованием камеры газогенерации позволяет значительно снизить выбросы вредных веществ при сжигании жидких углеводородов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 23-79-10029, <https://rscf.ru/project/23-79-10029/>).

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЦИКЛОВ НА УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Садкин И.С.^{1,2*}, Щинников П.А.²

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

*[*sadkinvanya@mail.ru](mailto:sadkinvanya@mail.ru)*

Одним из основных источников антропогенных выбросов в атмосферу является энергетика на органическом топливе. Её доля в мировом энергобалансе велика и, даже в условия снижения, продолжает оставаться доминирующей. Поэтому задачи развития энергетики на органическом топливе рассматривают через призму сокращения эмиссии CO₂ в атмосферу, в том числе и в России. На этом фоне развивается направление, связанное с созданием новых CO₂ циклов и энергоустановок на их основе, где углекислый газ используется в качестве рабочего тела.

Целью исследования является комплексное рассмотрение различных конфигураций кислородно-топливных энергетических циклов с использованием диоксида углерода в качестве рабочего тела с определением взаимосвязанных термодинамических, энергетических и технико-экономических характеристик.

Новизна предлагаемых к исследованию технических решений подтверждается патентом на способ производства электроэнергии на основе закритического цикла на углекислом газе (патент РФ №2810854), способом подземной газификации угля с производством электроэнергии (патент РФ №2816145) с использованием CO₂ цикла.

В ходе многопараметрических исследований [1, 2] определено, что энергоблоки на основе CO₂-циклов имеют КПД выработки электроэнергии 65-73% при параметрах на входе в турбину 1100-1200 °С, 30 МПа, превосходя все традиционные энергоблоки. Коэффициент собственных нужд CO₂-энергоблоков находится на уровне 22-50% в зависимости от конфигурации и параметров. КПД нетто превышает 50%, что делает их менее выгодными по показателю отпуска электроэнергии, чем ПГУ, но предпочтительнее ГТУ, СКП и ССКП с технологиями улавливания CO₂ (CCS).

Для установки мощностью 100 МВт показатель удельных капиталовложений лежит в интервале 1150-1350 \$/кВт при изменении температуры от 900 до 1400 °С и 1050-1300 \$/кВт при изменении давления от 15 до 30 МПа. Наименьшими показателями удельной стоимости обладает цикл Аллама – 950-1150 \$/кВт, что сопоставимо со стоимостью ПГУ. Себестоимость производимой электроэнергии в долларовом эквиваленте составляет 5,5-7,5 центов за кВтч. Себестоимость снижается по мере роста температуры рабочего тела для всех вариантов исполнения цикла. Наименьшей себестоимостью обладают энергоблоки на базе цикла Аллама и цикла с конденсацией.

Литература

1. Алексеев С.В., Щинников П.А., Садкин И.С. Влияние термодинамических параметров на энергетические характеристики CO₂-циклов при кислородном сжигании метана // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 89-98.
2. Sadkin I.S., Borush O.V., Shchinnikov P.A. Analysis of energy consumption for auxiliaries of zero emissions sCO₂ power plants // Energy Conversion and Management. – 2025. – Vol. 323, Part A. – Art. No. 119266.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ АВ₅-ТИПА

Свеженцева А.Ю.^{1*}, Казаков А.Н.², Блинов Д.В.^{1,2}

1) Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

2) Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

* svezhentsevaalisa@yandex.ru

В условиях глобальных климатических изменений и истощения углеводородных ресурсов вопрос поиска чистых и устойчивых источников энергии становится всё более актуальным. Для эффективной работы нетрадиционной энергетики необходимы доступные и надежные технологии выработки и хранения энергии. Водород, получаемый путем электрохимического преобразования энергии возобновляемых источников, рассматривается как ключевой элемент энергетической системы будущего. Хранение и преобразование водорода в электроэнергию можно осуществлять в установках с применением металлгидридных технологий, основанных на обратимом образовании гидридных фаз в кристаллической структуре водородпоглощающих материалов.

Ni-MH аккумуляторы обладают рядом преимуществ, такими как высокая удельная плотность хранимой энергии, устойчивость к перезаряду/переразряду, быстрой кинетикой заряд-разряда, экологичностью и безопасностью. Металлогидридные сплавы, используемые в качестве анодов в Ni-MH аккумуляторах, являются многокомпонентными системами, вариация составов которых влияет на электрохимические характеристики электродов и на энергоэффективность установки в целом. ИМС АВ₅ типа отличаются высокой каталитической активностью, легкостью активации и циклической стабильностью и являются одним из популярных коммерчески используемых материалов [1,2].

В ходе данной работы были созданы электроды на основе сплавов La_{0.8}Ce_{0.2}Ni₄Co_{0.4}Mn_{0.3}Al_{0.3}, La_{0.6}Ce_{0.2}Nd_{0.2}Ni₄Co_{0.4}Mn_{0.3}Al_{0.3}, LaNi_{4.6}Mn_{0.2}Al_{0.2} и LaNi_{4.4}Fe_{0.3}Al_{0.3} и исследованы их электрохимические свойства, такие как кинетика активации, максимальная разрядная емкость, производительность электродов при высоких плотностях тока и циклическая стабильность. Изучено влияние дорогостоящих компонентов ИМС Nd и Co на основные характеристики исследованных электродов.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 25-19-00696).

Литература

1. Ouyang, L., et al., Progress of hydrogen storage alloys for Ni-MH rechargeable power batteries in electric vehicles: A review. Materials Chemistry and Physics, 200(Supplement C): p. 164-178, (2017).
2. А. Ю. Свеженцева, Н. С. Сергиенко, Д. В. Блинов, А. Н. Казаков. "Разработка металлгидридных электродов на основе LaNi₅ и исследование их свойств", Энергосбережение - теория и практика : Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием, Москва, 10–14 октября 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", с. 205-209 (2022).

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ ОТ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Тарулин М.А.^{1,2*}, Копьев Е.П.¹

1) *Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*

2) *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

[*tarulin.mark@gmail.com](mailto:tarulin.mark@gmail.com)

Цель данного исследования заключается в анализе влияния свойств жидких углеводородных топлив на оптимальные условия горения при их распылении с использованием перегретого водяного пара. В рамках исследования был разработан алгоритм анализа режимных карт сжигания, который позволяет выявить режимы с низким содержанием вредных веществ и высокой эффективностью работы горелочного устройства. Установлено, что наилучшие показатели достигаются в области между аппроксимированными уравнениями минимальных концентраций оксида углерода и градиентной поверхностью их максимальных значений.

Корреляционный анализ физических свойств топлива и угловых коэффициентов уравнений оптимального режима позволил установить связь между характеристиками топлива и условиями оптимальной работы горелочного устройства (см. рис. 1). Полученную зависимость можно описать линейным уравнением коэффициент детерминации которой равен 0,7.

Полученные результаты исследования могут быть применены для совершенствования процессов сжигания углеводородных топлив в струе перегретого водяного пара в горелочных устройствах, что позволит повысить их энергоэффективность и снизить концентрацию вредных веществ в продуктах сгорания.

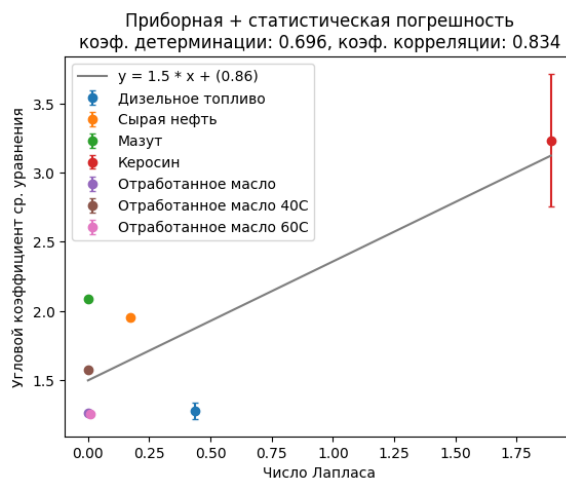


Рис. 1. График зависимости числа Лапласа и угловых коэффициентов условий оптимального режима с доверительными интервалами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ № 19-79-30075, https://www.rscf.ru/prjcard_int?19-79-30075).

Содержание

Пленарные доклады	3
Алексеев С.В. Геотермальная энергия: настоящее и будущее.....	4
Бондарь Е.А. Вычислительная динамика разреженных газов: достижения и перспективы.....	5
Виноградова О.И. Смачивание, шероховатость и немного соли как путь к быстрым течениям в тонких каналах.....	6
Дедов А.В. Плазменно-пучковые испытания компонент термоядерных установок, обращенных к плазме.....	7
Дектерев А.А. Рациональное математическое моделирование процессов в энергетических установках	8
Левин А.А. Характеристики пузырькового кипения на теплоотдающих поверхностях: эксперименты и реализация численных моделей	9
Минаков А.В. Развитие и применение микро и нанофлюидных технологий в задачах нефтегазовой индустрии.....	10
Скрипов П.В. Явление перегрева жидкостей: история исследований и текущие задачи / к 60-летию открытия метода импульсного нагрева.....	11
Токарев М.П. Панорамные методы 3d диагностики скорости гидроаэродинамических потоков	12
Хвесьюк В.И. Новое направление теплофизики- теплофизика наносистем.....	13
Черданцев А.В., Актёршев С.П., Гузанов В.В., Квон А.З., Бобылев А.В. Волновые ручейковые течения: теория и эксперимент.....	14
Якуш С.Е., Сиваков Н.С. Паровые взрывы: физическое явление и проблемы моделирования.....	15
Секция 1. Турбулентные течения, тепло- и массообмен в однофазных средах	16
Балабаев Н.Е., Беляев И.А. Экспериментальное исследование влияния электрической проводимости стенки на образование магнитно-конвективных пульсаций потока в вертикальных каналах.....	17
Беляев И.А., Миронов И.С. Исследование влияния магнитного поля на динамику струйного течения жидкого металла	18
Дунайцев А.А., Клементьев А.А., Сапожников И.С. Разработка cfd-модели активной зоны реактора бр-1200	19
Дулин В.М. Когерентные вихревые структуры в закрученных струях. Оптическая диагностика и управление	20
Кочурин Е.А., Кузнецов Е.А. Моделирование трехмерной акустической турбулентности.....	21
Кочурин Е.А., Русских П.А. Моделирование турбулентности плоско-симметричных капиллярных волн	22
Крикунова А.И., Чешко А.Д. Управление пределами существования метано-воздушных пламен путем модификации предварительно перемешанных смесей водородом	23

Кутепова А.И., Хотяновский Д.В., Сидоренко А.А. Эволюция одиночного возмущения в пограничном слое с градиентом давления.....	24
Лукьянов А.А., Ничик М.Ю., Лебедев А.С., Добросельский К.Г. Исследование влияния сквозных отверстий в цилиндре на процессы развития ближнего следа	25
Маркин В.В., Поливанов П.А., Бунтин Д.А. Влияние струйного вихрегенератора на когерентные структуры в сдвиговом слое	26
Нугуманов Д.И., Бердов Р.Д., Волков Н.Н., Волкова Л.И. Анализ тепловых процессов в газодинамических трубах в условиях однофазного потока.....	27
Панкратов Е.В. Исследование теплообмена закрученного потока с парной спирально-вихревой структурой в кольцевом канале	28
Рахимов Р.Ф., Беляев И.А., Пятницкая Н.Ю. Экспериментальное исследование турбулентного течения щелочного раствора в поперечном однородном магнитном поле	29
Руденко Ю.К., Винниченко Н.А., Пуштаев А.В., Плаксина Ю.Ю., Уваров А.В. Восстановление течения турбулентной осесимметричной струи с применением физически-информированной нейросети	30
Сагитов Р.В. Устойчивость течения водорода в наклонном подогреваемом слое при наличии внешнего горизонтального градиента давления	31
Сероштанов В.В., Князев С.А., Гусаков А.А. Интенсификация теплообмена на поверхности цилиндра с помощью стержней-турбулизаторов	32
Сластная Д.А., Хребтов М.Ю. Численное исследование устойчивости ламинарного конусного пламени в зависимости от теплового состояния кромки сопла	33
Сорокин М.И., Токарев М.П., Дулин В.М. Анализ трехмерной структуры течения в ячейке бенара методом лагранжевого отслеживания частиц	34
Тищенко В.А., Попов В.В., Гаврилов И.Ю., Грибин В.Г., Тищенко А.А., Бердюгин К.А., Соколов Д.Г., Смирнов А.О. Применение нейронных сетей в задачах газодинамики решеток турбомашин	35
Шенягин Е.М., Беляев И.А., Лучинкин Н.А., Синяев Д.А. Экспериментальное исследование свободной конвекции в жидком металле вблизи вертикального цилиндра в магнитном поле	36
Яцких А.А., Лысенко В.И., Смородский Б.В., Юзенас А.Д., Афанасьев Л.В., Семенов А.Н. Численное моделирование развития возмущений в сверхзвуковом пограничном слое на пластине с наклонными к потоку слотами	37
Секция 2. Тепломассобмен и гидродинамика в многофазных средах.....	38
Аксенов А.А., Сиренко А.Г. Численное моделирование обтекания деформируемого твёрдого тела с учётом теплового расширения в программном комплексе FLOWVISION	39
Антонов Д.В., Керимбекова С.А. Гидродинамика потока аэрозольных частиц лекарственных препаратов при адресной доставке в дыхательные пути.....	40
Архипов В.А., Басалаев С.А., Матвиенко О.В., Перфильева К.Г., Романдин В.И. Моделирование процесса испарения капель в восходящем нагретом потоке воздуха...	41
Вдовин М.И., Сергеев Д.А. Влияния пенного покрова на обмен импульсом и теплом в турбулентном пограничном слое воздушного потока над водной поверхностью	42

Верходанов Д.А., Вожаков И.С., Пискунов М.В., Хомутов Н.А. Влияние характеристик поверхности на разбрызгивание капель воды при высокоскоростном соударении	43
Дементьев Ю.А., Дегтярёв С.А., Чиннов Е.А. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления в плоских микроканалах.....	44
Зайнуллина Э.Р., Митяков В.Ю. Сапожников С.З. Измерение местных коэффициентов теплоотдачи при конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе	45
Здорников С.А., Исаенков С.В., Черданцев А.В. Влияние свойств жидкости на развитие газожидкостного течения в горизонтальной трубе.....	46
Зотьева А.А., Ничик М.Ю., Дулин В.М. Экспериментальное исследование теплообмена на границе масло–вода методом двухцветного PLIF.....	47
Исламова А.Г., Кропотова С.С., Ткаченко П.А., Стрижак П.А. Соударение капель суспензий при варьировании концентрации твердых частиц.....	48
Исламова А.Г., Кропотова С.С., Шуляев С.А., Стрижак П.А. Взаимодействие капель и углеродистых частиц под воздействием высокотемпературного встречного потока воздуха	49
Кархов А.О., Воробьев М.А. Влияние поверхностно-активных веществ на характеристики газовых пузырей в наклонном канале	50
Наумов И.В., Скрипкин С.Г., Шарифуллин Б.Р. Вихревые биотехнологии: от фундаментальных исследований вихревого движения к практическим приложениям..	51
Пискунов М.В., Пискунова А.Е., Ашихмин А.Е. Математическое моделирование дозирования водного раствора тимьяна в процессе микрофлюидного инкапсулирования	52
Прасолов Д.Ю., Бердов Р.Д., Гурина И.Н., Цацуев С.М. Особенности теплообмена в газодинамических трубах при течении двухфазного потока.....	53
Пряжников М.И., Хеди Б., Волченко Е.Н., Пряжников А.И., Минаков А.В. Модифицированные полимерные и сшитые гелевые системы на основе полиакриламида для повышения нефтеотдачи	54
Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И., Зотова А.Н., Ермакова О.С., Краев И.М. Исследование механизмов, определяющих процесс фрагментации по типу парашют при обдуве планарной границы жидкости газовым потоком	55
Смирнов Н.И., Родионов А.А., Васильев М.М., Шухов Ю.Г., Старинский С.В. Изучение свойств смачиваемости суперлиофобных лазернотекстурированных поверхностей в условиях разреженной атмосферы	56
Тищенко В.А., Попов В.В., Гаврилов И.Ю., Грибин В.Г., Тищенко А.А., Бердюгин К.А., Соколов Д.Г., Смирнов А.О. Применение нейронных сетей для обработки результатов экспериментальных исследований влажно-паровых потоков в турбомашинах.....	57
Хасанов Д., Диева Н.Н. Эффективность термохимического метода воздействия раствором перекиси водорода на коллекторы с тяжелой нефтью.....	58
Шаин А.М., Смирнов Н.И., Старинский С.В., Вожаков И.С. Численное моделирование зависимости скорости скольжения капли глицерина по наклонной гидрофобной поверхности от температуры.....	59

Шебелев А.В., Гаврилов А.А., Минаков А.В. Численное исследование влияния параметров бурения на эффективность промывки скважины наномодифицированными буровыми растворами	60
Шульженко П.Д., Мешкова В.Д., Литвинцев К.Ю., Дектерев А.А. Метод зонирования городской застройки на основе биоклиматических критериев комфорта .	61
Секция 3. Тепломассообмен при фазовых превращениях, интенсификация теплообмена, кипение, теплофизика микро- и наносистем, процессы в разреженных газах и плазме	62
Баринов А.А. Анализ влияния определяющих факторов на теплофизические свойства полупроводниковых структур микро- и наномасштабов	63
Батыршин К.Э., Солнышкина О.А., Батыршин Э.С. Влияние распределителя потока на эффективность микрофлюидного теплообменника	64
Бобылев П.Г., Павлов А.В., Андрейко С.В., Митяков В.Ю. Исследование теплообмена при кипении воды в большом объеме на оребренных поверхностях с использованием изотермических вставок.....	65
Васильев М.М., Миськив Н.Б., Смирнов Н.И., Терехов В.В., Старинский С.В. Влияние микро- и наноструктуры перегретого лазерно-текстурированного кремния на динамику вскипания падающей капли воды	66
Гарифуллин И.Ш., Батыршин К.Э., Солнышкина О.А., Батыршин Э.С. Исследование процессов рекативно-ионного травления кремния с использованием CF_4/Ar для приложений микроэлектроники	67
Гатапова Е.Я. Межфазный тепломассоперенос на микромасштабе при фазовом переходе	68
Зорькина А.И., Павлов И.А., Роньшин Ф.В. Исследование кипения диэлектрической жидкости в плоском микроканале	69
Инь Ф., Лю Ш., Хвесюк В.И. Метод расчёта вероятности зеркального отражения волн от шероховатых поверхностей.....	70
Лю Ш., Хвесюк В.И. Взаимодействие фононов в анизотропном графене	71
Лю Ш., Чжан Г., Хвесюк В.И. Исследование теплоемкости наноструктур на основе нейроэволюционного потенциала	72
Роньшин Ф.В., Зорькина А.И., Редников А., Тадрист Л., Кабов О.А. Влияние неконденсирующихся газов на рост парового пузыря при кипении в условиях микрогравитации	73
Ситников В.О., Некрут Е.О., Гатапова Е.Я. Исследование динамики капли и пузырей в капле жидкости при падении на нагретую подложку с использованием машинного обучения	74
Чжан Г., Лю Ш., Хвесюк В.И. Исследование динамики решетки кремниевых пленок с различной ориентацией	75
Секция 4. Теплофизические свойства веществ и лучистый теплообмен, теплофизические проблемы энергетики, энергоэффективность и энергосбережение	76
Алехин С.А., Федяева О.Н. Горение бурого угля, антрацита и их смесей в водокислородном флюиде.....	77

Архипов В.А., Басалаев С.А., Кузнецов В.Т., Перфильева К.Г. Закономерности зажигания образцов электродного угля лучистым тепловым потоком	78
Бездудный А.В., Дуников Д.О., Блинов Д.В. Металлогидридная технология для аккумулирования тепловой энергии.....	79
Буряковская О.А., Тарасенко А.Б., Кочегарова А.В., Сулейманов М.Ж., Балабаев Н.Е., Шавелкин М.А., Беляев И.А. Программно-аппаратный комплекс для исследования тепловых процессов в литий-ионных аккумуляторах	80
Казаков А.Н., Блинов Д.В., Бездудный А.В., Еронин А.А., Дуников Д.О. Повышение эффективности теплообмена в металлогидридной системе хранения энергоустановки h2smart	81
Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Матвиенко О.В., Лобода Ю., Луценко А.В., Мартынов П.С., Рейно В.В. Генерация и перенос горящих частиц во время крупных пожаров: теоретико-экспериментальный подход	82
Клименко А., Исламова А.Г., Шуляев С.А., Шлегель Н.Е. Взаимодействия капель аэрозоля с твердыми частицами угля при варьировании температуры газовой среды ..	83
Коновалов О.И.; Мелихов В.И. Исследование коллапса паровых пузырьков как механизма перемешивания расплава с водой при стратифицированной конфигурации	84
Модорский В.Я., Калюлин С.Л., Владимиров Н.В., Черепанов И.Е., Серегина М.А., Бабушкина А.В. Численное моделирование теплового состояния электронного агрегата в связанной постановке	85
Никитин А.Д., Абаймов Н.А., Ершов М.И., Касилин Я.В., Тупоногов В.Г., Осипов П.В., Богатова Т.Ф., Плотников Л.В., Симбирятин Л.В., Алексеенко С.В., Рыжков А.Ф. Исследование воздушной газификации биомассы в пилотной установке применительно к энергетике	86
Попов А.Н., Любов В.К., Алексеев П.Д. Энергетическое использование верхового торфа и осадка сточных вод	87
Романов И.А., Дуников Д.О., Еронин А.А., Казаков А.Н. Модифицированный метод измерения рст-изотерм металлогидридов.....	88
Садкин И.С., Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю. Исследование влияния добавления газов разбавителей и окислителей на процесс горения жидкого топлива в струе перегретого водяного пара.....	89
Садкин И.С., Щинников П.А. Комплексный анализ эффективности генерации электроэнергии на основе циклов на углекислом газе	90
Свеженцева А.Ю., Казаков А.Н., Блинов Д.В. Исследование свойств и повышение ресурсоэффективности металлогидридных электродов АВ ₅ -типа	91
Тарулин М.А., Копьев Е.П. Корреляционный анализ зависимости характеристик оптимального режима горения от физических свойств углеводородного топлива.....	92

