



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



НКТМ  
РАН



N\*



РНО

VIII Всероссийская научная конференция  
с элементами школы молодых учёных

# ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

г. Махачкала  
НОК «Журавли»  
4–10 сентября 2023 г.

Научная молодёжная школа  
ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ  
ГИДРОДИНАМИКА:  
СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

г. Махачкала  
НОК «Журавли»  
4–10 сентября 2023 г.

## ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ



Министерство науки и высшего образования РФ  
Сибирское отделение РАН

Национальный комитет по тепломассообмену

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

НИ Новосибирский государственный университет

Новосибирский государственный технический университет

Дагестанский государственный университет

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН

Научная молодёжная школа проводится при финансовой поддержке  
Российского научного фонда грант №19-79-30075  
и ООО "Игма-ро"

Министерство науки и высшего образования РФ  
Сибирское отделение РАН  
Национальный комитет по теплообмену

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН  
НИ Новосибирский государственный университет  
Новосибирский государственный технический университет  
Дагестанский государственный университет  
Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН

VIII Всероссийская научная конференция  
с элементами школы молодых учёных

# **ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА**

Махачкала  
НОК «Журавли»  
4–10 сентября 2023 г.

**Научная молодёжная школа**

## **ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ**

Махачкала  
НОК «Журавли»  
4–10 сентября 2023 г.

### **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

Новосибирск 2023

Сборник содержит тезисы докладов VIII Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ2023) и, проводимой в рамках этой конференции, научной молодёжной школы «Теплофизика и физическая гидродинамика: современные вызовы» (ТФГСВ2023). Конференция является продолжением серии всесоюзных конференций молодых исследователей, проводимых при участии Института теплофизики СО РАН с 70-х годов XX века. В этом году конференция проходит в г. Махачкала. Организаторами конференции выступают Сибирское отделение Российской академии наук, Национальный комитет по тепло- и массообмену РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Дагестанский государственный университет, Новосибирский государственный университет, Новосибирский государственный технический университет, Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН. Целью конференции является обсуждение современных задач в области теплофизики и гидрогазодинамики, поиск путей их решения, а также подготовка научного кадрового резерва высокой квалификации и привлечение молодых ученых к наиболее актуальным исследованиям. В сборник включены тезисы докладов по следующим направлениям: теплообмен и гидродинамика в однофазных средах; гидродинамика и теплообмен в многофазных системах; фазовые переходы; научные основы нефтегазовых технологий; гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы; численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике; методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента; теплофизические свойства веществ и новые материалы; теплообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах; электрофизические явления в газовых и жидких средах; теплообмен и гидродинамика в технологических процессах и защита окружающей среды. Материалы, представленные в сборнике, могут быть полезны студентам вузов, аспирантам и научным сотрудникам соответствующих специальностей.

### Председатель

Маркович Д.М., академик РАН

### Заместители

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

Марчук И.В., профессор РАН, д.ф.-м.н.

### Учёный секретарь

Макаров М.С., к.ф.-м.н.

### Технический комитет

Наумкин В.С., к.ф.-м.н.

Роньшин Ф.В., к.ф.-м.н.

Ниналалов С.А., к.ф.-м.н.

Сластная Д.А.

ООО "Научный сервис"

### Научный комитет

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

Алхасов А.Б., профессор, д.т.н. (ИПГВЭ ОИВТ РАН, Махачкала)

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

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

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

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

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

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

Кабов О.А., член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Кедринский В.К., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Коротаев Г.К., член-корреспондент РАН (МГИ РАН, Севастополь)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Пухначёв В.В., член-корреспондент РАН (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

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

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

Сможж Д.В., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Christos Markides, PhD (Imperial College London, UK)

Издание сборника докладов производилось с авторских листов участников конференции.

За ошибки и опечатки авторов издательство ответственности не несёт.

ISBN 978-5-89017-082-8

© Институт теплофизики СО РАН, 2023



Научная молодёжная школа

ТЕПЛОФИЗИКА и ФИЗИЧЕСКАЯ  
ГИДРОДИНАМИКА:  
СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

ПЛЕНАРНЫЕ ЛЕКЦИИ





## ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ СЕВЕРОКАВКАЗСКОГО РЕГИОНА

Алхасов А.Б., Алхасова Д.А.

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН

В Восточно-Предкавказском артезианском бассейне (ВПАБ) площадью более 200 тыс. км<sup>2</sup> в его вертикальном разрезе выделяются три яруса гидрогеотермальных ресурсов – низко-, средне- и высоко-температурных, изолированных друг от друга мощными глинистыми отложениями. Для их освоения разработан ряд технологий и предложены методы теплового и гидродинамического расчетов.

В верхнем плиоценовом ярусе залегают термальные воды температурой 20 – 60 °С и минерализацией 1 – 3 г/дм<sup>3</sup>, используют для водоснабжения и орошения. Разработаны технологии их комплексного использования в тепло- и водоснабжении в теплонасосных системах теплоснабжения и последующим доведением качества воды до кондиций «Вода питьевая».

В среднем миоценовом ярусе температура воды составляет 70 – 110 °С, минерализация 5 – 30 г/дм<sup>3</sup>. В основном используют для тепло- и горячего водоснабжения с двухконтурной системой. Предложена технология совместно-раздельной добычи термальных вод из разных горизонтов одной скважиной. В такой скважине участок от верхнего пласта до устья является внутрискважинным теплообменником, изучены процессы тепломассопереноса, предложены формулы для определения дебита воды, поднимающейся с нижнего пласта и в межтрубном кольцевом зазоре скважины с верхнего пласта. Предложен ряд схем совместно-раздельной добычи с ГЦС-технологией. Технологию совместно-раздельной добычи можно успешно реализовать при добыче высоковязкой нефти.

Разработана технология (рис. 1) комбинированной геотермально-парогазовой энергетической системы с утилизацией запасов низконапорного остаточного газа в блоке ГТЭС.

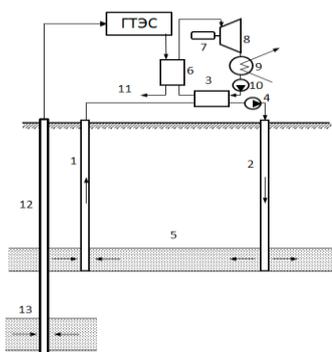


Рис. 1. Комбинированная ГПЭС

1 и 2 – добычная и нагнетательная скважины; 3 – теплообменник; 4 – насос ГЦС; 5 – термальный пласт; 6 – испаритель; 7 – генератор; 8 – турбина; 9 – конденсатор; 10 – насос; 11 – отвод отработанных газов; 12 – газовая скважина; 13 – газовый пласт.

В такой системе нагрев низкокипящего рабочего тела в бинарной ГеоЭС происходит за счёт термальной воды, а его испарение и перегрев осуществляется за счет выхлопных газов ГТЭС. Газ из скважины 12 подается в блок ГТЭС, где вырабатывается электроэнергия. Отработанные в цикле ГТЭС газы подаются в испаритель 6 бинарной ГеоЭС, в котором происходит испарение и перегрев низкокипящего рабочего агента, предварительно нагретого до температуры насыщения термальной водой, циркулирующей в контуре ГЦС, в теплообменнике 3. Перегретый пар из испарителя 6 последовательно проходит турбину 8, конденсатор 9 и циркуляционный насос 10 и далее поступает в теплообменник 3, цикл, реализуемый в бинарной ГеоЭС, замыкается.

Перспективными являются геотермально-биогазовые технологии, где тепло термальной воды используется для ускорения процесса брожения при переработке животноводческих отходов.

В нижнем мезозойском ярусе залегают рассолы хлоридно-натриевого и кальциевого состава с минерализацией 60 – 210 г/дм<sup>3</sup> и температурами 130 – 220 °С и выше. Газовый фактор в этих водах доходит до 10 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> и более. Термальные воды являются промышленным гидроминеральным сырьем с высоким содержанием лития, рубидия, цезия, стронция, йода, брома, бора, калия и магния. Потенциальные ресурсы составляют 2,6 млн м<sup>3</sup>/сут. В настоящее время эти ресурсы не осваиваются, хотя имеется более 2000 простаивающих скважин на выработанных нефтегазовых месторождениях в пределах ВПАБ, которые можно перевести на добычу с привлечением незначительных капитальных затрат. Разработан ряд схем комплексного освоения высокотемпературных геотермальных рассолов. Тепло рассола используется для получения электроэнергии в бинарной ГеоЭС, отработанный рассол с низкой температурой из ГеоЭС поступает на завод, где при полном извлечении химических компонентов вода на выходе опресняется. При температуре рассола более 180 °С наиболее оптимальным является сверхкритический термодинамический цикл, реализуемый в бинарной ГеоЭС, где наиболее эффективно используется тепло рассола с доведением его конечной температуры до 45 °С.

Предложена технология съема тепла с термальной воды непосредственно в пласте без её подъема на поверхность. В такой технологии в геотермальном пласте скважина имеет протяженный горизонтальный ствол, куда с поверхности по межтрубному кольцевому пространству закачивается теплоноситель. Нагретый теплоноситель на поверхность поднимается по теплоизолированной центральной колонне. Изучены процессы тепломассопереноса в такой скважине.

**Игуменов И.К.<sup>1</sup>, Лукашов В.В.<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup> Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 3, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Одним из критически значимых направлений совершенствования изделий, работающих в экстремальных условиях, является разработка новых методов и подходов формирования защитных покрытий. В настоящее время многие десятки технологий осаждения различных функциональных покрытий с использованием летучих соединений объединены под общим названием – процессы химического осаждения из газовой фазы: CDV, MOCVD, ALD, CVI, PECVD и др. Общей идеологической платформой, объединяющей эти процессы, является транспорт паров исходного летучего соединения в зону осаждения из газовой фазы с использованием в качестве прекурсоров комплексов металлов с органическими лигандами (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition). Покрытия формируются при распаде «изолированной» молекулы летучего соединения на нагретой подложке, что позволяет, варьируя параметры процесса реализовать практически любые варианты, начиная от системы несвязанных наночастиц, вплоть до сплошных «толстых» микронных слоев. Фундаментальные основы MOCVD идентичны и практически не зависят от экспериментальных параметров процесса.

Большой проблемой является многообразие используемых прекурсоров. К настоящему времени в различных CVD процессах протестировано около 1000 летучих прекурсоров разнообразного состава и строения. В основном, это комплексы металлов с органическими лигандами молекулярная масса которых колеблется от 80 до 1500 а.е.м, ван-дер-Ваальсов диаметр до 1,5 нм, а давления пара- от десятков до 10-5 торр при 300К. Термическая стабильность прекурсоров лежит в интервале 300-1000 К, а, собственно, термораспад прекурсоров и процессы формирования покрытий на поверхности исследованы крайне слабо. Информация о теплофизических параметрах (переноса) в газовой фазе практически полностью отсутствует.

На сегодняшний день разработаны многие десятки различных типов CVD реакторов отличающихся по способу массопереноса прекурсора в зону реакции, давлению в реакционной камере, организации реакционной зоны, дополнительной активации поверхности изделия, газа-реактанта и др. Каждый из разработанных методов осаждения покрытий имеет свои преимущества, ограничения и недостатки. Одним из основополагающих факторов, определяющих эффективность управления CVD процессом, является способ организации взаимодействия потока реагентов и материала подложки, на которой осуществляется осаждение покрытия. Закономерности осаждения функционального покрытия в CVD процессе опреде-

ляется процессами переноса тепла и вещества вблизи подложки и стимулированным распадом прекурсора на поверхности с образованием покрытия, т.е. интенсивностью конвективного тепломассообмена на поверхности подложки и составом газовой смеси на «стенке». Состав веществ на поверхности в приближении подобия процессов переноса можно оценить, используя условие глобальной реакции горения прекурсора на стенке. Такие оценки адекватно описывают известные экспериментальные факты, позволяют прогнозировать влияние входных условий на параметры покрытия и могут быть использованы как инструмент для организации управления технологическим процессом на основе подходов «цифрового двойника» с использованием ИИ.

В целом, процесс образования покрытия включает следующие семь ключевых этапов:

1. Транспортировка газообразных веществ в реактор.
2. Образование промежуточных частиц из реагирующих газообразных частиц.
3. Диффузия промежуточных частиц через пограничный слой на поверхность подложки.
4. Адсорбция этих частиц на поверхности.
5. Одностадийные или многостадийные реакции на поверхности подложки.
6. Десорбция побочных продуктов из субстрата.
7. Принудительный выход непрореагировавших газов и побочных продуктов из реактора.

Оценки влияния динамики течения на особенности кинетики каталитических процессов выходят на первый план при анализе активированных методов осаждения покрытий, например графена. Известно, что реакции гетерогенного каталитического окисления могут сопровождаться различными нелинейными явлениями, такими как гистерезис, автоколебания и даже хаотическая динамика скорости реакции, приводящие к неравномерному росту покрытия.

Применение нанопокрывтий для регулирования структуры, состава и свойств поверхности является стандартной практикой в современном материаловедении. Создание новых покрытий с повышенными функциональными параметрами и процессов их формирования связано с решением новых сложных научных и технологических задач.

Большой потенциал CVD технологий позволяет с уверенностью прогнозировать рост интереса к методам, позволяющим управлять морфологией и свойствами покрытий.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-13-00117).*

**АНОМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОТРЫВНОГО ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ  
И ТЕПЛООБМЕНА НА ПЛАСТИНЕ И СТЕНКЕ УЗКОГО КАНАЛА  
В ПРИЛОЖЕНИИ К МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ И ВОЗДУШНЫМ КОНДЕНСАТОРАМ.  
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Исаев С.А.**

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,  
196210, Россия, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: isaev3612@yandex.ru

Вихревые технологии [1] приобрели междисциплинарный характер. Прорывные результаты получены при разработке энергоэффективных структурированных поверхностей [2-19].

Открыто явление интерференции потока, взаимодействующего с наветренной кромкой наклонной канавки на обтекаемой пластине и стенке узкого канала, и сгенерированного на входе в канавку смерчеобразного вихря, которое сопровождается ультравысоким перепадом давления между зонами торможения и разрежения. До двух раз растёт скорость возвратного течения, а скорость вторичного течения достигает величин, превышающих среднemasсовую скорость.

Обоснованы аномальная интенсификация отрывного течения и теплообмена в наклонных канавках на энергоэффективных поверхностях с многократным (до 6-9 раз) увеличением относительного трения и тепловых потоков внутри канавок, а также ускорение пристеночного потока однорядными наклонными канавками особенно в узких каналах (более 1.5 раз).

Выполнено аэродинамическое проектирование новых структурированных лунками и канавками энергоэффективных поверхностей.

*Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке РФ (гранты №№22-19-00056 (эксперимент) и 23-19-00083 (расчеты)).*

**Список литературы**

1. Вихревые технологии для энергетики / А.И. Леонтьев, С.В. Алексеенко, Э.П. Волчков и др.; Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 350 с.
2. Isaev S.A., Schelchkov A.V., Leontiev A.I., Gortyshov Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A. Tornado-like heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Int.J.HMT. 2017. Vol.109. P. 40-62.
3. Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y. and Popov I. Vortex heat transfer enhancement in narrow channels with a single oval-trench dimple oriented at different angles to the flow // J. ENТ. 2018. V. 25. No.6. P.579-604.
4. Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Nikushchenko D., Popov I. and Sudakov A. Simulation of vortex heat transfer enhancement in the turbulent water flow in the narrow plane-parallel channel with an inclined oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Energies. 2019. V.12. No.1296. P.1-24.
5. Исаев С.А., Баранов П.А., Гортышов Ю.Ф., Леонтьев А.И., Попов И.А., Щелчков А.В., Миронов А.А., Скрыпник А.Н. Теплообменная поверхность. Патент РФ. RU 2716958 С1, МПК F28F 3/04 (2006.01). Заявка 2019124260, 26.07.2019 опубликована 17.03.2020 Бюл. № 8.
6. Исаев С.А., Баранов П.А., Леонтьев А.И., Попов И.А. Интенсификация ламинарного течения в узком микроканале с однорядными наклонными овально-траншейными лунками // ПЖТФ. 2018. Т. 44. Вып. 9. С. 73-80.
7. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Гульцова М.Е. Интенсификация теплообмена при ламинарном вихревом течении воздуха в узком канале с однорядными наклонными овальными лунками // ИФЖ. 2018. Т.91. №4. С.1022-1034.
8. Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G. Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel // Int.J.HMT. 2019. V. 134. P. 338-358.
9. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В., Попов И.А. Энергоэффективные поверхности с многорядными наклонными овально-траншейными лунками для воздушных конденсаторов // Энергетика. 2020. № 4. С. 3-10.
10. Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019. V. 163 (Part.A). P. 202-207.
11. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Попов И.А., Судаков А.Г. Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклонных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // ТВТ. 2019. Т. 57. №5. С. 797-800.
12. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В. Ускорение турбулентного потока в узком облуненном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклонных овально-траншейных лунок на стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т.26. №5. 697-702.
13. Isaev S.A., Gritckevich M.S., Leontiev A.I., Milman O.O., Nikushchenko D.V. Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples // Int. J. HMT. 2019. V. 145. P.118737.
14. Исаев С.А., Мазо А.Б., Никущенко Д.В., Попов И.А., Судаков А.Г. Влияние на аномальную интенсификацию отрывного турбулентного течения угла наклона однорядных овально-траншейных лунок на стабилизированном гидродинамическом участке узкого канала // ПЖТФ. 2020. Т. 46. Вып. 21. С.18-21.
15. Mironov A., Isaev S., Skrypnik A. and Popov I. Numerical and Physical Simulation of Heat Transfer Enhancement Using Oval Dimple Vortex Generators —Review and Recommendations // Energies. 2020. V. 13. P. 5243.
16. Миронов А.А., Исаев С.А., Скрыпник А.Н., Попов И.А., Гортышов Ю.Ф. Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овально-траншейными вихрегенераторами // ТПТ. 2020. Т. 12. №9. С. 386-402.
17. Исаев С.А., Чулюнин А.Ю., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Анализ аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена на стабилизированном участке узкого канала с однорядными наклонными овально-траншейными лунками при использовании различных сеток и моделей турбулентности // ТВТ. 2021. Т. 59. № 1. С. 116-125.
18. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Никущенко Д.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Интенсификация отрывного течения в наклонных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала // ИФЖ. 2021. Т.94. №1. С.160-168.
19. Исаев С.А., Судаков А.Г., Чорный А.Д., Жукова Ю.В., Усачов А.Ю. Интенсификация теплообмена в микротрубе с коридорным пакетом сферических и наклонных овально-траншейных лунок при прокачке трансформаторного масла // ТВТ. 2019. Т. 57. №. 6. С. 866-869.

**ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ДВУХФАЗНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ  
ТЕПЛОНАПРЯЖЁННОГО ОБОРУДОВАНИЯ****Кузнецов В.В.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Новые разработки в области компьютерных центров обработки данных, силовой электроники, радаров и лазеров привели к значительному увеличению тепловыделения от локальных источников тепла большой интенсивности и необходимости разработки принципиально новых технологий охлаждения. Это обусловило развитие двухфазных систем охлаждения, которые используют фазовый переход жидкость-пар для повышения коэффициента теплоотдачи на несколько порядков и снижения затрат на прокачку теплоносителя [1].

Среди технологий двухфазного охлаждения наибольшую эффективность при высоких тепловых потоках показали кипение в условиях вынужденной конвекции в мини/микроканалах, микроструйное охлаждение и паровые камеры, рассмотренные в данной работе. Приведены характеристики теплообмена в данных условиях для различных теплоносителей, обсуждены достижимые критические тепловые потоки, рассмотрены методы интенсификации процесса теплообмена за счёт организации течения теплоносителя и изменения структурных характеристик охлаждаемой поверхности.

Представлены новые результаты в области гидродинамики и тепломассообмена при фазовых превращениях в микроканальных системах в условиях вынужденной конвекции. Рассмотрены новые результаты в области капиллярной гидродинамики газожидкостных течений в каналах малого размера, обсуждено влияние смачивания стенок каналов и волн на поверхности жидкости на распределение жидкой фазы и режим двухфазного течения, предложены новые подходы к расчету газожидкостных течений на малых и сверхмалых масштабах. Применительно к разработке микроканальных систем терморегулирования теплонапряженного оборудования рассмотрены физические механизмы теплообмена при насыщенном и недогретом кипении воды, фреонов и диэлектрической жидкости HFE 7100 в микроканальных системах охлаждения, в том числе с наномодифицированной поверхностью. Рассмотрены особенности кривых кипения, коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков в данных условиях, обоснованы методы подавления преждевременного кризиса кипения и повышения критического теплового потока. Предложен и экспериментально обоснован метод расчёта теплообмена при кипении недогретой и насыщенной жидкости в условиях вынужденной конвекции в микроканалах, учитывающий совместно вклад двухфазной вынужденной конвекции, подавления пузырькового кипения и испарения волновой пленки жидкости.

Представлены новые результаты в области теплообмена при натекании системы затопленных распределенных и локализованных микроструй жидкости на теплонапряженную поверхность, расположенную в щелевом канале. Применительно к разработке микроструйных систем охлаждения рассмотрены физические механизмы теплообмена при натекании систем локализованных и распределенных затопленных струй воды и диэлектрической жидкости HFE 7100 на охлаждаемую поверхность с учетом недогретого кипения. Рассмотрены особенности кривых кипения, коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков для различной скорости и диаметра струй, обоснованы методы повышения критического теплового потока и снижения температуры охлаждаемой поверхности. Предложен и экспериментально обоснован метод расчета теплообмена при микроструйном охлаждении в условиях недогретого кипения для микроструй, распределенных по охлаждаемой поверхности.

Рассмотрены особенности применения паровых камер для выравнивания поля температуры теплонапряженной поверхности с локальными источниками тепловыделения большой мощности. Показано, что паровые камеры, имеющие низкое тепловое сопротивление, являются необходимым элементом систем охлаждения теплонапряженной поверхности в данных условиях. Рассмотрены механизмы испарения и кипения в пористом фитиле паровой камеры, обеспечивающем интенсивный капиллярный приток жидкости к зоне испарения, предложена конструкция многомасштабного фитиля, позволяющая подавить высыхание фитиля и увеличить передаваемый тепловой поток.

Проведено сопоставление термогидравлической эффективности микроканальных и микроструйных систем охлаждения теплонапряженного оборудования, получено, что наибольшую эффективность имеют интегрированные системы охлаждения, объединяющие преимущества микроканального и микроструйного охлаждения, дополненные паровыми камерами. Рассмотрены особенности применения технологий двухфазного охлаждения для терморегулирования теплонапряженных элементов энергетических устройств и электронного оборудования

**Список литературы**

1. Mudawar I. Recent advances in high-flux, two-phase thermal management // J. Therm. Sci. Eng. Appl. 2013. V.5. P. 021012-1.

*Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет гранта  
Российского научного фонда (проект № 21-19-00626).*

**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СИСТЕМ СУХОГО ОХЛАЖДЕНИЯ  
НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ****Мильман О.О.**

ЗАО Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон»,  
248010, Россия, Калуга, Комсомольская роща, 43  
КГУ имени К.Э. Циолковского  
248023, Россия, Калуга, Степана Разина, 26

Системы сухого охлаждения занимают все большее место в проектах и практике электростанций. Так за 10 лет с 2009 по 2019 мощность ввода таких систем увеличили в 1,8 раза.

На практике реализованы три типа сухого охлаждения: воздушные конденсаторы (ВКУ) с конденсацией пара внутри труб, конденсаторы смесительного типа, когда вода охлаждается в сухой градирне (СВГ), и поверхностные конденсаторы в сочетании с СВГ. Наиболее эффективна первая схема с воздушным конденсатором.

Практически реализация этих схем зависит от реальных климатических условий, квалификации персонала, степени освоения технологии изготовления.

Проведены испытания на экспериментальных стендах нескольких типов оребренных трубных пучков, особое внимание уделено определению термического сопротивления контакта ребро-стенка в условиях неизотермической стенки.

Проведены испытания макетов трубных пучков сухих вентиляторных градирен, воздушных конденсаторов и натурной секции воздушного конденсатора, получены высокие для таких аппаратов коэффициенты теплопередачи, а также разработан режим пуска и останова в условиях низких наружных температур.

Результаты исследования внедрены в практику проектирования, изготовления и эксплуатации сухих вентиляторных градирен и воздушных конденсаторов.

В процессе исследования выявлены и впервые описаны явления понижения эффективности теплообмена при конденсации пара в многорядных трубных пучках, обдуваемых поперечным потоком воздуха.

Показана эффективность установки дросселей небольшого гидравлического сопротивления на линии отвода неконденсирующих газов в секционных (воздушных) конденсаторах.

Накоплен большой опыт обследования и испытаний СВГ и ВКУ на тепловых электростанциях, определены минимально допускаемые тепловые нагрузки, обеспечивающие надежную работу оребренных трубных пучков при низких наружных температурах.

На основании проведения научных исследований введены в эксплуатацию блоки большой мощности с сухими вентиляторными градирнями на Грозненской ТЭС, проектирование, изготовление и поставку которых обеспечило ЗАО НПВП «Турбокон» с использованием отечественного оборудования.

На установках зарубежной поставки осуществляется научно – техническое сопровождение сложного технического объекта в части обеспечения эффективности и надежности его работы.

Научно – технические материалы по исследованию, разработке, вводу в эксплуатацию сухих воздушных охладителей ВКУ и СВГ и научно – техническое сопровождение использовались в заявке на премию Правительства в 2023 г. в области науки и техники.

**Список литературы**

1. Мильман О.О., Федоров В.А. «Воздушно- конденсационные установки и сухие градирни», М., МГТУ, 2019 г.
2. Федоров В.А., Мильман О.О. «Конденсаторы паротурбинных установок» М., МГТУ, 2013 г.

## НЕРАВНОВЕСНОСТЬ ПРОЦЕССОВ И СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ В ГОСУДАРСТВЕННЫХ ПЕРВИЧНЫХ ЭТАЛОНАХ РАСХОДА ТЕКУЧИХ СРЕД

Михеев Н.И., Давлетшин И.А., Душин Н.С.

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

Исследования процессов переноса в динамически неравновесных турбулентных течениях имеют инновационную направленность и многочисленные инженерные приложения в области теплоэнергетики, транспортного машиностроения и трубопроводного транспорта. Представлены результаты реализации некоторых результатов работ по проекту РНФ №22-19-00507 в прикладной области, связанной с созданием новых эталонных установок для контроля метрологических характеристик систем измерений количества энергоносителей при их добыче и транспортировке.

К государственным первичным эталонам расхода текучих сред предъявляются предельно высокие требования к точности: расширенная неопределенность воспроизведения объемного расхода единиц массы, объема и расхода текучей среды для разных типов эталонных установок не должна превышать 0.02...0.08%. При таких жестких требованиях даже сравнительно невысокая степень тепловой и динамической неравновесности процессов может существенно снизить точность передачи единицы расхода поверяемому средству измерения. Покажем это на примере активного газового прувера.

В эталонной установке с активным прувером газ перемещается под действием поршня из одной полости цилиндра в другую через измерительную линию, в которую устанавливается поверяемое средство измерения. Поршень перемещается от внешнего привода. Объем вытесненного поршнем газа может быть измерен весьма точно, но к расчетному сечению измерительной линии он заметно изменится, что связано с изменением давления и температуры газа при движении в канале. Само по себе это изменение при максимальной скорости потока газа в измерительной линии составляет не более 1.5%, но оно более чем на порядок превышает допустимый предел погрешности воспроизведения расхода.

Одна из основных составляющих неопределенности передачи единицы расхода поверяемому средству измерения связана, как ни парадоксально, с тепловой неравновесностью процессов. На рис.1 показано типичное изменение температуры газа в напорной полости цилиндра в зависимости от хода штока поршня для случая высокого гидравлического сопротивления поверяемого расходомера. Как видно из рисунка, в процесс сжатия - нестационарный: температура газа в напорной полости цилиндра к концу процесса перекачки повышается немногим более 1 К относительно начального значения. Этот газ с переменной температурой поступает в толстостенную металлическую трубу измерительной линии, постепенно нагревая ее. Оценка объема газа в условиях переменной по времени и координате температуры требует ряда мер по снижению неопределенности результата измерений, поскольку неопределенность температуры 0,2 К

даже без учёта других факторов «выбирает» весь допустимый предел погрешности воспроизведения расхода.

Другая проблема связана с колебательным движением среды при выходе на режим даже при сравнительно плавном разгоне поршня. Колебания сопровождаются формированием разгонных вихрей в измерительной линии, как это видно из рис.2, на котором представлены результаты детального моделирования процессов. Принят ряд мер для снижения доли переходных процессов в циклограмме работы установки.

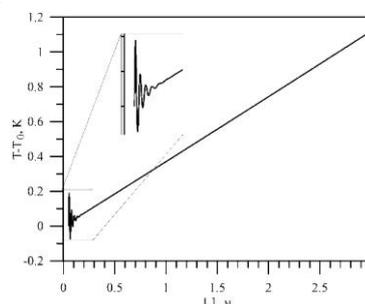


Рис.1. Динамика изменения температуры в напорной полости цилиндра

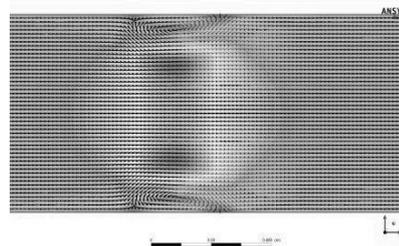


Рис.2. Фрагмент мгновенного поля течения в измерительной линии в начальный период движения поршня

Для обеспечения требуемой точности эталонов выполняется многоуровневое моделирование процессов с различной степенью их детализации, экспериментальная проверка на моделях различного масштаба. На основе таких подходов в период с 2013 г. по настоящее время ФИЦ КазНЦ РАН совместно с НПП Ирвис по заданиям ВНИИР и ВНИИМ выполнил цикл исследований и разработок, результатом которых стало создание эталонных установок в составе государственных первичных эталонов единиц массы, объема и расхода газа (ГЭТ-118) и жидкости (ГЭТ-63). Ведутся работы по созданию первичного эталона единицы массового расхода газожидкостных смесей нефть-газ-вода (ГЭТ-195), а также первичного специального эталона единицы объемного расхода природного газа при давлении до 10 МПа. В результате исследований найдены и внедрены пионерские решения, которые способствовали выходу эталонной базы РФ в области расходомерии на лидирующие позиции в мире.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №22-19-00507).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПО ИЗМЕРЕНИЮ ТЕПЛОвого ПОТОКА, ПОГЛОЩЕННОГО ЭЛЕМЕНТОМ КОСТРУКЦИИ

Ненарокомов А.В., Будник С.А., Титов Д.М., Ревизников Д.Л., Неверова Д.А., Моржухина А.В.

Московский Авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
Волоколамское ш. 4, Москва, 125973, Россия

Создание новых и совершенствование существующих объектов аэрокосмической техники требует разработки новых более эффективных методов и средств диагностики тепловых режимов конструкций, агрегатов и систем. Такие методы и средства необходимы, как на различных этапах создания аэрокосмических конструкций (в частности, при проведении теплофизических исследований на этапе проектирования, при проведении экспериментальной отработки конструкций, а также при проведении испытаний объектов, включая стендовые и лётные), так и при их эксплуатации (в частности, в системах автоматизированного управления тепловыми режимами и в системах предупреждения внештатных ситуаций).

Этим требованиям отвечает комплексная методология обратных задач теплообмена (ОЗТ) [1,2], на основе которой может быть создано методическое и техническое обеспечение современной технологии диагностики тепловых режимов аэрокосмических конструкций.

В данной работе представлены результаты экспериментов, проведенных на установке конвективного нагрева УКН-1 (рис. 1), включенной в состав автоматизированного комплекса ВТС-ОЗТ Тепловой лаборатории НИО-601 МАИ; с использованием датчика теплового потока ДТП-ГД для определения характеристик газового потока.

Представлена методика подготовки и проведения тепловых испытаний датчика ДТП-ГД-2 на установке УКН-1 с различными источниками нагрева.



Рис. 1 Установка УКН-1.

Конструкция датчика ДТП-ГД-2 (рис. 2), разработанного ранее для проведения тепловых испытаний на установке УКН-1 обладает рядом важных свойств, в частности:

- Чувствительный элемент и корпус датчика выполнены из высококачественной меди (Cu), теплофизические и радиационно-оптические свойства которой известны с достаточно высокой точностью во всем диапазоне рабочих температур.

- Для измерения температур в ЧЭ датчика используются микротермопары типа ХА с диаметром термоэлектродов  $\varnothing=0,1\text{мм}$ , что позволяет уменьшить размеры «горячего» спая и снизить отток тепла по

термопарным проводам, что в свою очередь позволяет уменьшить искажения температурного поля в ЧЭ;

- В конструкции датчика используется схема температурных измерений с минимально необходимым количеством и рациональным размещением точек измерения в ЧЭ;

- Конструкция датчика и технология его изготовления обеспечивает возможность контроля точности установки термопар в ЧЭ относительно его нагреваемой поверхности. Ошибки в определении координат точек измерения температур могут существенно влиять на точность решения соответствующей граничной ОЗТ и как следствие на точность определения теплового потока.



Рис. 2 Датчик теплового потока ДТП-ГД-2.

Результаты испытаний представлены на рис.3.

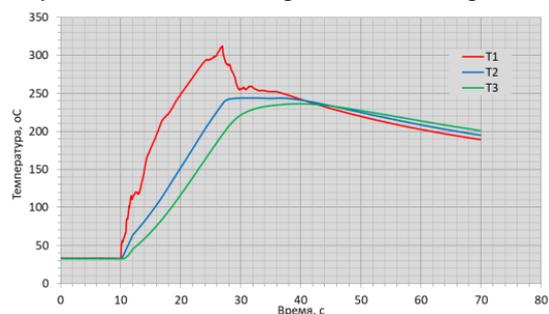


Рис. 3 Результаты температурных измерений.

### Список литературы

1. Inverse Heat Transfer Problems / Alifanov O.M.; Berlin: Springer-Verlag, 1994. 301p.
2. Extreme Methods for Solving ill-posed Problems with Applications to Inverse Problems / Alifanov O.M., Artyukhin E.A. and Rumyantsev S.V.; New York: Begell House, 1995. 287p.
3. Powers C.A., Kennedy W.S. and Rindal R.A. Heat Flux Measurement Using Swept Null Point Calorimetry // Journal of Spacecraft. 1971. V. 9, N 9, P. 1121-1134
4. Löhle S., Battaglia J-L., Jullien P., van Ootegem B., et.al. Improvement of High Heat Flux Measurement Using a Null-Point Calorimeter // Journal of Spacecraft and Rockets. 2008. V. 45, N 1, P. 27-39.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-19-00683).

## СТРУКТУРА ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ ЖИДКИЙ МЕТАЛЛ И ГАЗОВАЯ ФАЗА

Лобанов П.Д.<sup>1</sup>, Прибатурин Н.А.<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН  
ул. Б. Тульская, 52, Москва, 115191, Россия

Двухфазное течение, состоящее из жидкого металла и газовой фазы имеет гораздо более низкое отношение плотности газа к жидкости, чем двухфазные среды воздух-вода, азот-вода и пар-вода. Большая разность плотностей может создать большую плавучесть, действующую на газовую фазу и повлиять на форму, размер и эволюцию пузырьков, движущихся в жидком металле.

Исследование совместного течения жидкого металла и газа производилось для задач атомной энергетики применительно к реакторным установкам на жидких металлах, процессам очистки металлов и сплавов, непрерывной выплавки стали. Несмотря на это имеется ограниченное число работ по исследованию структуры двухфазных потоков, состоящих из жидкого металла и газовой фазы. Сложность изучения двухфазного течения в жидких металлах связана с их непрозрачностью и высокой температурой. Использование численных методов для предсказания такого двухфазного течения требует наличия большой базы экспериментальных данных, поскольку необходимо понимать особенности таких течений, а также валидировать как расчётные коды, так и замыкающие соотношения.

В данной работе проведено детализированное экспериментальное исследование структуры и режимов течения двухфазной среды, состоящей из жидкого металла (свинец, свинцово – висмутовый сплав, сплав Розе) и дисперсной фазы (аргон, азот, водяной пар).

Эксперименты проводились на гидродинамических контурах, в которых всегда была обеспечена однородность температуры всех конструктивных элементов для исключения областей «захлаживания» металла. В качестве рабочих участков использованы вертикальные цилиндрические каналы различных диаметров (8, 20, 30, 68 мм). Температура, при которой в канале проводились измерения составляла для расплава свинца 450 °С, для свинцово – висмутового сплава 160 °С, и сплава Розе 120-140 °С. Двухфазная среда создавалась путем инжектирования в жидкий металл газа. Расход газа при этом мог изменяться. Все эксперименты были выполнены при давлении в рабочем участке равном атмосферному давлению.

Применение оригинальных методик измерений позволило определить параметры пузырей инертного газа в расплавленном металле (размер, частоту отрыва, отрывной диаметр), измерить газосодержание, скорость движения газовой фазы. Была проведена оригинальная визуализация двухфазного течения, позволившая зафиксировать эволюцию пузырей в жидком металле.

В результате измерений получены следующие экспериментальные данные:

- частота генерации пузырей при истечении газа через одиночные отверстия;
- форма, размер и эволюция образующихся в жидком металле пузырей;
- скорость движения пузырей;
- гистограммы распределения пузырей по размерам в зависимости от расхода газовой фазы;
- локальное и интегральное газосодержание в каналах разного диаметра, спектры его пульсаций и гистограммы распределения;
- особенности пузырькового и снарядного режимов течения;
- закономерности разрушения снарядного режима течения в зависимости от расхода газовой фазы;
- скорости дрейфа газовой фазы в жидком металле.

На основе полученных данных проведена оценка отрывного диаметра пузырей в жидком металле и его сопоставление с корреляциями, имеющимися в литературе.

Данные измерений эволюции пузырьков обобщены на основе критериев подобия, таких как числа Рейнольдса, Этвеша и Мортонна, устанавливающих форму и динамику движения пузырьков в различных жидкостях. Показано, что для пузырькового режима формируются четыре подобласти по форме пузырька: пузырьки правильной сферической формы, несферические пузырьки (эллипсоидальные), переходный режим и несферические пузырьки (в форме сферических сегментов).

При снарядном режиме двухфазной среды формируются газовые полости с хаотично меняющейся поверхностью на границе жидкого металла и газа. Их форма отличается от «классической» формы пузыря Тейлора в круглой трубе, фиксируемой в двухфазных течениях с «неметаллическими» жидкостями. Обнаружено, что устойчивого снарядного режима двухфазной среды из жидкого металла и газа не существует. При высоких расходах газа снарядный режим течения переходит в режим хаотического чередования фрагментов жидкого металла и газовой фазы с развитием ударно – волновых явлений.

Проведены экспериментальные исследования ударно – волновых процессов, которые возникают при импульсном впрыске газа в расплавленный металл. Для этого режима определены характерные величины и частоты пульсаций давления в канале с жидким металлом, колебания свободного уровня металла.

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Рудяк В.Я.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,  
ул. Ленинградская, 113, Новосибирск, 630008, Россия  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия  
e-mail: valery.rudyak@mail.ru

Свойства наножидкостей радикально отличаются от свойств обычных крупнодисперсных жидкостей и не описываются классическими теориями. Сегодня надёжно изучены их реология и теплопроводность [1-3]. С практической точки зрения во многих приложениях наножидкостей наряду с теплопроводностью необходимо знать и их электропроводность, (например, в солнечных энергетических установках [4,5]). Тем не менее работ по изучению электропроводности наножидкостей немного (см. обзор [6]). Изучались преимущественно наножидкости с наночастицами оксидов и нитридов металлов. Фактически почти нет работ, где бы изучалась электропроводность наножидкостей с металлическими частицами. Мало работ по измерению электропроводности наножидкостей с углеродными нанотрубками (УНТ), а известные практически невозможно сопоставлять, поскольку они получены для разных наножидкостей, с одностенными (ОУНТ) или многостенными (МУНТ) УНТ и разных базовых жидкостей. Неясно, в какой степени электропроводность наночастиц или УНТ влияет на общую электропроводность наножидкости, как она зависит от размера наночастиц и электропроводности базовых жидкостей, и т.п.

Цель данной работы и состоит в ответе на эти вопросы. Работа состоит из трёх частей. В первой приводятся данные измерений электропроводности наножидкости на основе воды и этиленгликоля с частицами алюминия (75.2 нм) и меди (Cu I, 51.5 нм, и Cu II, 79.4 нм). Во второй – экспериментальные данные для наножидкостей с УНТ. В ряде случаев использовались поверхностно активные вещества (ПАВ). В третьей части выполнено систематическое сопоставление полученных данных, проанализировано влияние на электропроводность размера наночастиц и УНТ, их концентрации и базовых жидкостей. В заключении обсуждаются механизмы электропроводности всех изученных наножидкостей.

Наножидкости приготавливались двухшаговым методом [1]. На первом шаге необходимое по весу количество частиц или УНТ добавлялось в базовую жидкость и механически перемешивалось. Чтобы минимизировать наличие пучков УНТ или агломератов наночастиц, на втором шаге первичная наножидкость подвергается ультразвуковой обработке.

В результате можно сформулировать следующие основные выводы.

Во всех случаях электропроводность наножидкостей растёт с увеличением концентрации наночастиц или УНТ.

Электропроводность наножидкостей зависит от размера наночастиц, однако в отличие от теплопроводности электропроводность тем больше, чем меньше размер наночастиц. Превышение электропроводности

наножидкости с частицами Cu I при двадцатипроцентной концентрации частиц составляет два с половиной раза, а с частицами Cu II – почти семь с половиной.

Превышение электропроводности наножидкости зависит от электропроводности наночастиц. Так электропроводность наножидкости с частицами меди почти в два раза выше, чем с частицами алюминия.

Электропроводность наножидкости со сферическими частицами в диэлектрических базовых жидкостях определяется подвижностью образующихся ионов и наночастиц. Получены соответствующие оценки и показано, что учет электрофореза в теории Максвелла позволяет описать экспериментальные данные.

Превышение электропроводности существенно зависит от проводимости базовой жидкости, и это превышение растёт с увеличением проводимости базового флюида.

ПАВы во всех случаях увеличивают электропроводность первичных базовых жидкостей, что обусловлено различной ионизацией молекул дисперсантов. Наибольший эффект дают ионные ПАВы.

Электропроводность с ОУНТ значительно быстрее растёт с увеличением концентрации нанотрубок, чем с МУНТ. Это различие может составлять несколько порядков.

В электропроводность наножидкости с УНТ существенный вклад даёт электропроводность образующейся перколяционной решётки. В этом случае можно говорить о квазибалистическом механизме электропроводности. На это указывает и зарегистрированное снижение электропроводности наножидкостей с уменьшением аспектного отношения УНТ.

### Список литературы

1. Rudyak V.Ya. Features of transport processes of nanofluids // *Interfacial Phenomena Heat Transfer*. 2021. V. 9, N 2. P. 29–50.
2. Rudyak V.Ya., Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Guzey D.V. Measurement of the thermal conductivity and heat transfer coefficient of nanofluids with single-walled nanotubes // *High Temperature*. 2022. V. 60, N 5. P. 631–638.
3. Rudyak V.Ya., Dashapilov G.R., Minakov A.V., Pryazhnikov M.I. Comparative characteristics of viscosity and rheology of nanofluids with multi-walled and single-walled carbon nanotubes // *Diamond & Related Mat.* 2023. V. 132. P. 109616.
4. Olfian H., Ajarostaghi S.S., Ebrahimnataj M. Development on evacuated tube solar collectors: A review of the last decade results of using nanofluids // *Solar Energy*. 2020. V. 211. P. 265–282.
5. Xiong Q., Hajjar A., Alshuraiaan B., Izadi M., Altnji S., Shehzad S.A. State-of-the-art review of nanofluids in solar collectors: A review based on the type of the dispersed nanoparticles // *J. Cleaner Production*. 2021. V. 310. P. 127528.
6. Minea A.A. A Review on electrical conductivity of nanoparticle-enhanced fluids // *Nanomaterials*. 2019. V. 9. P. 1592.

*Работа поддержана РФФ (грант № 20-19-00043).*





# СЕКЦИЯ 1

## Теплообмен и гидродинамика в однофазных средах





## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

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

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

Надёжное предсказание тепловых нагрузок на внутренних поверхностях каналов технических устройств различного назначения является актуальной и сложной задачей, особенно в случае высокоскоростных течений. Определение тепловых потоков в каналах необходимо для выбора направления тепловой защиты. Исследования тепловых потоков проводится с помощью датчиков, принцип действия которых основан на измерении температуры. Экспериментальные данные об изменении температуры можно также использовать для верификации численных моделей сопряжённого теплообмена. В [1] моделирование нагрева чувствительного элемента датчика теплового потока (ДТП) выполнено в условиях стационарного течения. Целью данной работы является изучение влияния нестационарных условий на входе в канал на нагрев чувствительных элементов ДТП.

Исследуемая модель представляет собой прямоугольный канал с внезапным расширением, по длине которого расположены датчики давления и тепловых потоков [2]. Диаметр чувствительного элемента составляет 3 мм, а толщина 0,3 мм. Численное моделирование проведено в программе Ansys Fluent 2020 R1 в двух- и трёхмерной постановках без учёта /с учётом сопряжённого теплообмена. Расчётная область сопряжённой задачи соответствовала экспериментальной модели и кроме газовой области включала твердотельные зоны, которые моделировали медные чувствительные элементы ДТП. В газовой среде решались нестационарные осреднённые по Фавру уравнения Навье-Стокса, дополненные  $k-\omega$  SST моделью турбулентности. В качестве газа использован воздух, плотность которого вычисляется по закону идеального газа, а вязкость - по закону Сазерленда. В твердотельной среде решается уравнение теплопроводности. При решении сопряжённой задачи учитывается тепловое взаимодействие между газовой и твёрдой средой.

Входные условия расчетов приведены в Таблице. Параметры случая 3 соответствовали экспериментальным [2]. В случаях 1 и 2 параметры торможения  $P_0$ ,  $T_0$  выбраны такими же, как и в случае 3. В 3 - 5 случаях совпадали статические параметры  $P_\infty$ ,  $T_\infty$ . Расчёт задачи включал два этапа. На первом решалась стационарная задача без учёта прогресса элементов ДТП. На входе в канал задавались постоянные параметры потока, приведённые в Таблице. На стенке задана температура  $T_w = 300$  К. На втором этапе решалась нестационарная задача с учётом сопряжённого теплообмена между потоком воздуха и медными элементами ДТП при «падающих» входных условиях для статических параметров:

$$P(t) = P_\infty \cdot e^{-19t}; T(t) = T_\infty \cdot e^{-4.3t},$$

соответствующим экспериментам в импульсной установке в режиме присоединенного трубопровода [2].

Таблица. Параметры течений при  $t=0$ .

Case	$U$ , м/с	$P_0$ , бар	$T_0$ , К	$P_\infty$ , бар	$T_\infty$ , К
1	1720	115	2220	3.13	793
2	1920	115	2220	0.22	370
3	1820	115	2220	0.76	529
4	1380	28	1480	0.76	529
5	2300	402	3174	0.76	529

Результаты расчётов случая 3 сопоставлены с экспериментальными данными. Анализ показал, что расчётная волновая структура течения согласуется с экспериментальной. Значения статического давления на стенках канала, полученные в 2D и 3D расчётах, совпадают с точностью 3% и менее, чем на 10% отличаются от экспериментальных.

На рисунке 1 представлены графики средней по объёму элемента температуры  $\Delta \bar{T} = (T(t) - T(0)) / T(0)$ , полученной в 2D расчётах для ДТП, расположенного перед расширением канала. Точками обозначены экспериментальные данные (случай 3). Сравнение показало, что для всех элементов ДТП, расположенных по длине канала, максимальное отличие расчётных температур от экспериментальных значений, не превышает 7%. Выполненные с изменением входных параметров расчёты позволяют оценить их влияние на прогрев элементов ДТП, и, следовательно, уровень тепловых потоков в стенку.

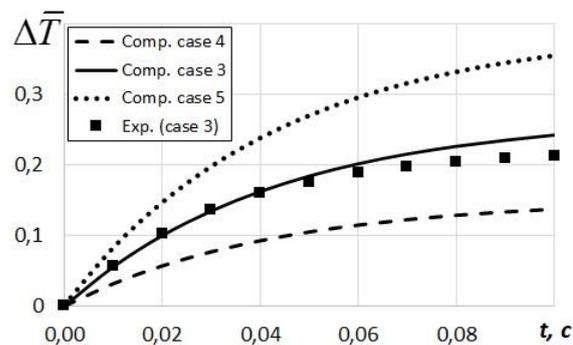


Рис.1. Прогрев чувствительного элемента ДТП, расположенного перед расширением канала.

### Список литературы

1. Васнев И. Р., Федорова Н. Н. Численное моделирование нагрева стенок экспериментальной модели в сверхзвуковых течениях // ПМТФ. 2023. Т. 64. № 2. С. 121-26. Doi:10.15372/PMTF202215140.
2. Goldfeld M. The heat flux research in hydrogen supersonic combustor at Mach number of 4 // Int. Jour. Hydrogen Energy. 2021. V. 46. P. 13365-76. Doi:10.1016/j.ijhydene.2021.01.093.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-29-00776).

Давлетшин И.А.<sup>1,2</sup>, Михеев Н.И.<sup>1</sup>, Шакиров Р.Р.<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН, ул. Лобачевского 2/31, Казань, 420111, Россия<sup>2</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, ул. К. Маркса 10, Казань, 420111, Россия

Отрыв потока является широко распространенным явлением в природе и технике [1]. Процессы теплообмена и гидродинамическая картина становятся заметно более сложными при вынужденных пульсациях потока [2, 3].

В работе представлены результаты экспериментальных исследований теплоотдачи и структуры течения при отрывных явлениях в пульсирующих потоках. Рассмотрены различные геометрии канала, способствующие отрыву потока: единственный выступ на стенке канала (рис. 1); стенка с дискретной шероховатостью – с регулярным расположением выступов (рис. 2); острая входная кромка канала (рис. 3). Пульсации потока создавались вращающейся заслонкой, которая периодически перекрывала проходное сечение канала вблизи выхода. Устройство пульсатора позволяло регулировать частоту  $f$  и амплитуду  $A_U$  пульсаций скорости  $U$  потока по закону близкому к гармоническому –  $U = U_0 + A_U \sin(2\pi ft)$ .

В экспериментах на вход канала подавался воздух с параметрами окружающей среды. Теплообмен между стенкой и потоком воздуха был организован путём нагрева теплообменной стенки постоянным электрическим током. При этом обеспечивалось граничное условие, близкое к  $q_w = \text{const}$ .

Исследование структур пульсирующих отрывных потоков проводилось её визуализацией с использованием аэрозоли. С помощью оптического метода измерений SIV были получены двумерные поля скорости потоков. Проведён совместный анализ гидродинамических и тепловых параметров исследуемых течений.

По результатам экспериментов получено, что вынужденные пульсации потока приводят к образованию вихревой дорожки в отрывной зоне. На низкочастотных режимах вихри имеют большие размеры и малую интенсивность. С ростом частоты происходит уменьшение их размеров и рост интенсивности.

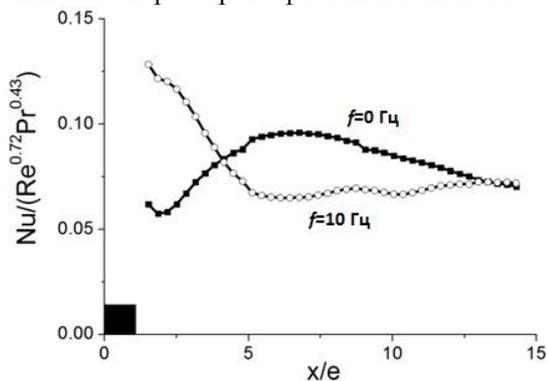


Рис.1. Коэффициент теплоотдачи за препятствием высотой  $e$  при пульсациях с амплитудой  $\beta = A_U/U_0 = 0,5$ .

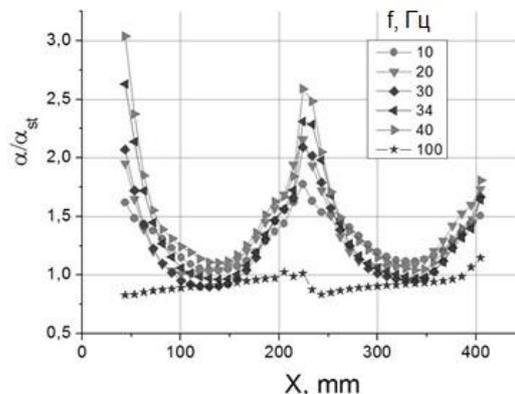


Рис.2. Прирост теплоотдачи в дискретно шероховатом канале с шагом выступов  $t/e=20$  при  $\beta \sim 0,8$ ;  $Re = 2,9 \cdot 10^4$ .

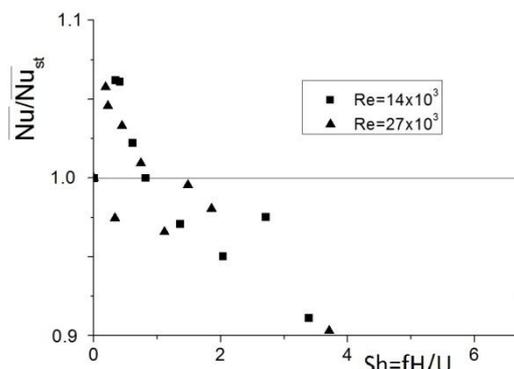


Рис.3. Прирост теплоотдачи на входном участке канала высотой сечения  $H$  при  $\beta \sim 0,8$ .

Механизм формирования теплоотдачи в отрывных пульсирующих потоках в целом показал согласие с гидродинамической картиной течений. Режимы с низкочастотными пульсациями потока показали теплообмен близкий к стационарному. Средне-частотные пульсации приводили к интенсификации теплоотдачи, которой способствовало интенсивное вихревое перемешивание теплоносителя между пристеночной областью и ядром потока. При высокочастотных пульсациях наблюдалось снижение теплоотдачи.

#### Список литературы

1. Separation of flow / Chang, P. K. Elsevier, 2014.
2. Davletshin I.A., Mikheev N.I. Flow structure and heat transfer during the separation of a pulsating flow // High Temperature. 2012. Т.50. №3. p. 412-419.
3. Davletshin I.A. et al. Convective heat transfer in the channel entrance with a square leading edge under forced flow pulsations // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Т. 129. p. 74-85.

Работа поддержана РФФ (грант №22-19-00507).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ УГЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

Дектерев А.А.<sup>1,2</sup>, Кузнецов В.А.<sup>1,2</sup>, Мальцев Л.И.<sup>1</sup>, Алексеенко С.В.<sup>1</sup>, Дектерев Ар.А.<sup>1,2</sup>, Тэпфер Е.С.<sup>1</sup>

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

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

В мире уголь по-прежнему является и в среднесрочной перспективе останется основным источником для выработки электрической и тепловой энергии [1]. В 2021 г. в РФ за счёт сжигания угля на крупных энергоблоках было получено около 16% от общего количества электроэнергии. На ТЭС России, также как и в мире, вряд ли стоит ожидать существенного уменьшения использования угля в ближайшие годы. Существующее энергетическое оборудование угольных ТЭС в большей части выработало свой ресурс и требует модернизации с применением экологически чистых и энергоэффективных ресурсосберегающих технологий.

Современный уровень развития и использования математического моделирования физико-химических процессов при горении угольного топлива в топочно-горелочных устройствах позволяет оперативно проводить исследования по изучению таких технологий и определять целесообразность их внедрения.

В работе с помощью численного моделирования рассмотрены новые технологии факельного сжигания угольного топлива, развиваемые в ИТ СО РАН, основанные на использовании воды и водяного пара для интенсификации горения, и снижения уровня образования экологически вредных выбросов.

Первая технология предлагается для крупных пылеугольных энергоблоков и основана на применении водоугольного топлива (ВУТ) в качестве топлива восстановителя при организации двух и трёхступенчатых схем сжигания [2].

Вторая технология позволяет для небольших котельных перейти от факельного сжигания мазута или слоевого сжигания угля к факельному сжиганию ВУТ [3].

Третья технология позволяет для малых энергоустановок организовать совместное сжигание в паромасляных горелках дизельного и пылеугольного топлива [4].

Для описания физико-химических процессов в предложенных технологиях использовалась модель движения многокомпонентной газовой среды (несущей фазы) с применением RANS модели турбулентности, модель сложного теплообмена, модель движения капель/частиц, процессов с ними, испарение/сушка, пиролиз, горение коксового остатка - на основе подхода Лагранжа, модель горения углеводородов в газовой фазе на основе гибридной модели, сочетающей механизмы химического реагирования и турбулентного обмена, модель образования  $\text{NO}_x$ .

Предложенная комплексная математическая модель тестировалась и адаптировалась на данных как лабораторных, так и натуральных экспериментов, выполненных в ИТ СО РАН и СибВТИ. Показано хорошее согласие расчёта с экспериментом.

На основе результатов математического моделирования было показано, что для энергоблоков ТЭС можно предложить низкочастотную модернизацию топочных камер с организацией горизонтальной или вертикальной ступенчатости при использовании сопел для ввода ВУТ. Высокоскоростные струи ВУТ приводят к интенсификации перемешивания топочной среды, снижению локальных температур в зоне активного горения и как следствие к существенному снижению (до 50%)  $\text{NO}_x$  в уходящих газах.

Для парового котла ДКВр-20-13 мощностью 1 МВт предназначенного для слоевого сжигания угля исследована схема вихревого сжигания ВУТ. Предложенный вариант модернизации топки внедрен на котельной № 7 ОАО «СКЭК» поселка Барзас Кемеровской области. Опробованы схемы сжигания с твёрдым и жидким шлакоудалением. Оба варианта подтвердили работоспособность: хорошее воспламенение; устойчивость горения; высокие экологические показатели -  $\text{NO}_x$  соответственно 76,6 и 101,8 ppm.

Выполнены расчётные исследования процессов в тангенциальном паромасляном горелочном устройстве и малогабаритной топочной камере (мощность до 20 кВт) при совместном сжигании дизельного и пылеугольного топлива при различных сочетаниях расходов топлив - дизельное/пылеугольное в диапазоне 100/0 до 50/50. В рассмотренных режимных вариантах наблюдается стабильное горение факела и относительно низкий, менее 5%, недожог топлива.

Проведённые расчётные исследования подтвердили возможность математического моделирования для отработки новых технологий факельного сжигания угля с использованием воды и водяного пара, что позволяет перейти к обоснованному проектированию перспективных и модернизации существующих горелочно-топочных устройств.

### Список литературы

1. А.Н. Тугов, И.В. Артемьева. Состояние угольных электрогенерирующих мощностей в мире // Энергохозяйство за рубежом, 2021, № 6, с. 1–24.
2. S.V. Alekseenko, A.A. Dekterev, L.I. Maltsev, V.A. Kuznetsov Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce  $\text{NO}_x$  emissions. Process Safety and Environmental Protection 169 (2023) 313–327.
3. S.V. Alekseenko, V.A. Kuznetsov, L.I. Mal'tsev, A.A. Dekterev, M.Yu. Chernetskii Analysis of Combustion of Coal-Water Fuel in Low-Power Hot-Water Boiler via Numerical Modeling and Experiments. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, Vol. 28, No. 2, pp. 177–189.
4. Е.С. Тэпфер, А.А. Дектерев, В.А. Кузнецов, А.А. Дектерев, Численное моделирование факельного горения угля микропомола в паромасляной горелке. Принята к публикации в Журнал СФУ. Техника и технологии. 16(4), 2023, 462–480.

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

Евграфова А.В.<sup>1</sup>, Ветров А.Л.<sup>2</sup>, Шапов В.А.<sup>1,3</sup><sup>1</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
ул. Ак. Королева 1, Пермь, 614013, Россия<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
ул. Букирева 15, Пермь, 614063, Россия<sup>3</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Комсомольский пр., д. 29, Пермь, 614990, Россия

Урбанизация стала одной из важнейших глобальных тенденций XXI века. Границы городов постепенно расширяются, что приводит к существенным изменениям свойств окружающей среды – одну из ключевых составляющих здоровья человека. Распределение температуры поверхности городов зависит от многих факторов. Ключевыми из них выделяют долю растительности [1-2] и радиационные свойства наружных строительных материалов [3]. Влияние геометрии города исследуется слабо. Отсутствие таких работ обусловлено тем, что на сегодняшний день нет единого инструмента, который позволяет получить распределение геометрических характеристик города с высоким пространственным разрешением. Кроме того, основная часть исследований тепловых характеристик города относится к крупным мегаполисам. Между тем, пик процесса урбанизации в настоящий момент происходит в небольших городах, для которых необходимо детальное прогнозирование путей дальнейшего развития. В данной работе представлен анализ температуры поверхности городов Пермь, Красноярск, Новосибирск и Омск. Проведен сравнительный анализ температуры поверхности этих городов за последние 10 лет, исследовано влияние плотности застройки, высоты зданий и особенностей рельефа местности на распределение температуры поверхности. Представлен инструмент получения геометрических характеристик городов для различного пространственного разрешения.

В качестве данных для анализа использованы спутниковые снимки Landsat 8. Снимки получены в период с мая по сентябрь 2013-2022 года в полуденные часы. Пространственное разрешение снимков – 30 м.

Распределение плотности и высоты застройки было рассчитано на основе данных из некоммерческого веб-картографического проекта OpenStreetMap. Информация о высоте поверхности получена из базы данных платформы Mapzen. Поля геометрических характеристик получены для каждого города с минимальным пространственным разрешением 30 м. Плотность застройки определялась как отношение площади, занимаемой зданиями, к общей площади рассматриваемой ячейки. Высота зданий и поверхности в каждой пространственной ячейке усреднялась.

На рис. 1 представлены зависимости коэффициента линейной корреляции между температурой поверхности и геометрическими характеристиками городов. Пространственное разрешение для корреляционного анализа было выбрано 300 м. Показано, что существенное влияние на распределение температуры оказывает плотность застройки. При этом для

Красноярска влияние плотности застройки на температуру оказывается минимальным по сравнению с другими городами. Мы полагаем, что такое отличие связано с особенностями рельефа местности города Красноярск. Город расположен в окружении Саянских гор, перепад высот в черте города достигает 400 м.

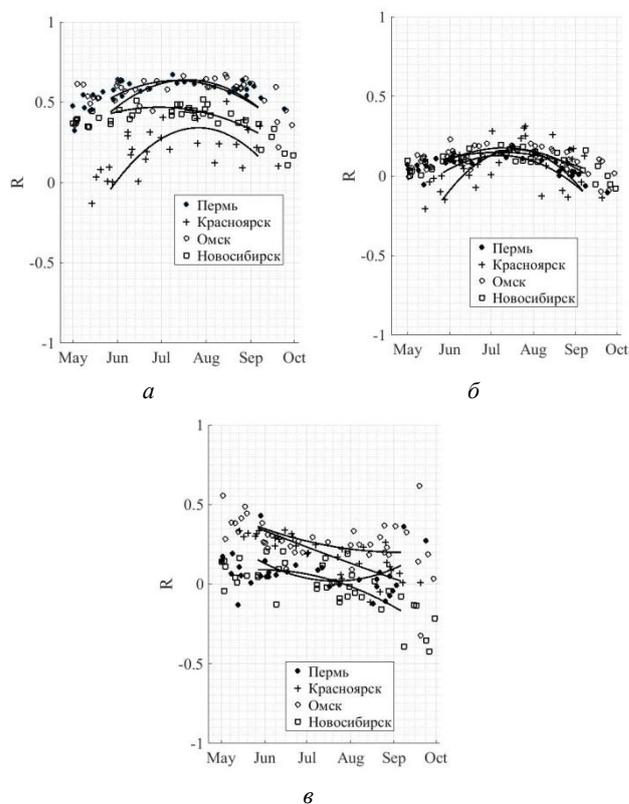


Рис. 1. Зависимость коэффициента линейной корреляции между температурой поверхности и а – плотностью застройки, б – высотой застройки, в – высотой поверхности

#### Список литературы

1. Logan T. M. et al. Night and day: The influence and relative importance of urban characteristics on remotely sensed land surface temperature //Remote Sensing of Environment. 2020. Т. 247. P. 111861.
2. Kalogeropoulos G. et al. Urban Heat Island and Thermal Comfort Assessment in a Medium-Sized Mediterranean City //Atmosphere. 2022. Т. 13. №. 7. P. 1102.
3. Song J., Wang Z. H. Evaluating the impact of built environment characteristics on urban boundary layer dynamics using an advanced stochastic approach //Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. Т. 16. №. 10. P. 6285-6301.

Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 22-61-00098

## ВЛИЯНИЕ УГЛА РАСТВОРА И СКОРОСТИ ПАДЕНИЯ НА ЗАХВАТ ВОЗДУХА ПРИ СОУДАРЕНИИ КОНУСА С ЖИДКОСТЬЮ

Карра Ж.-Б.<sup>1</sup>, Гаврилов Н.В.<sup>1</sup>, Черданцев А.В.<sup>2</sup>, Шмакова Н.Д.<sup>1</sup>, Ерманиук Е.В.<sup>1</sup>

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

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

При соударении твёрдого тела с жидкостью (либо жидких капель с твёрдым телом) возникает возможность формирования и последующего схлопывания воздушной полости в зоне начального контакта. Подобный эффект приводит к возникновению дефектов (воздушных пузырьков) при нанесении покрытий, а также к неравномерному охлаждению в ряде прикладных задачах. Целью данной работы является изучение влияния угла раствора конуса, его скорости и поверхностного натяжения жидкости на формирование и поведение воздушной полости.

В настоящей экспериментальной работе исследована задача о соударении тупого конуса из дюралюмина диаметром 180 мм с различным углом раствора  $\beta$  ( $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$  и  $5^\circ$  по отношению к плоскости основания) со свободной поверхностью глубокой жидкости (вода или 2.5% раствор бутанола (BWS)) в диапазоне скоростей  $V$  от 1.3 до 19.0 см/с. В зависимости от скорости и угла раствора наблюдаются четыре вида результатов схлопывания воздушной каверны (см. рис. 1): одиночный пузырёк воздуха в вершине конуса (рис. 1.а), несколько пузырьков вблизи вершины конуса (рис. 1.б), нерегулярная дорожка из пузырьков (рис. 1.в), регулярное полигональное кольцо из пузырьков (рис. 1.г). При фиксированных углах раствора и скорости конуса для воды и 2.5% раствора бутанола наблюдаются одинаковые результирующие воздушные каверны.

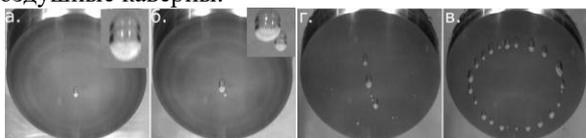


Рис. 1. Конечный тип воздушной подушки

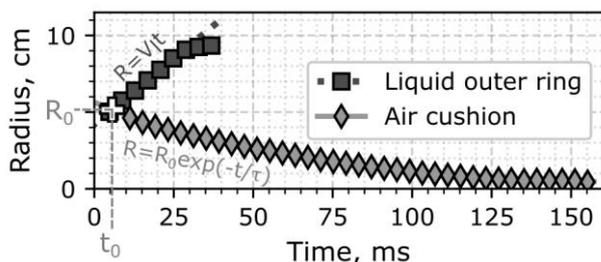


Рис. 2. Временная эволюция радиусов внешней границы зоны контакта (прямоугольник) и воздушной каверны (ромб).

При использовании эффекта полного внутреннего отражения (TIR) [1], внешний и внутренний диаметры зоны контакта оцениваются для каждого кадра. Причём для аппроксимации внешнего и внутреннего диаметров как функции времени используется линейная и экспоненциальная [2] зависимости, соответственно (см. рис. 2). Точка пересечения этих кривых дает оценку начального радиуса зоны контакта. При скоростях соударения больше 6 см/с скорость движе-

ния внешней границы зоны контакта  $V_1$  близка к соприкосновения, определенной теорией Вагнера,  $V_w$  (см. рис. 3).

Соотношение скейлинга, основанное на балансе давлений, обусловленных силами инерции жидкости и эффектом смазки в тонком воздушном слое (для случая сферической геометрии описано в [3, 4]), предполагает универсальную зависимость между начальным радиусом воздушного диска  $R_0$  и теоретическим параметром  $A$ ,  $R_0 \sim A$ , где  $A = \mu_g / (\rho_l V \tan(\beta)^2)$ ,  $\mu_g$  - динамическая вязкость воздуха и  $\rho_l$  - плотность жидкости. В настоящей работе показано (см. рис. 4), что начальные радиусы воздушного диска ложатся на универсальную зависимость от полученного теоретического параметра для обеих жидкостей в изученном диапазоне скоростей удара и углов раствора конуса.

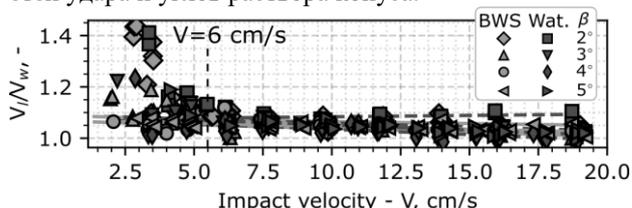


Рис. 3. Зависимость  $V_1/V_w$  от скорости удара  $V$ .

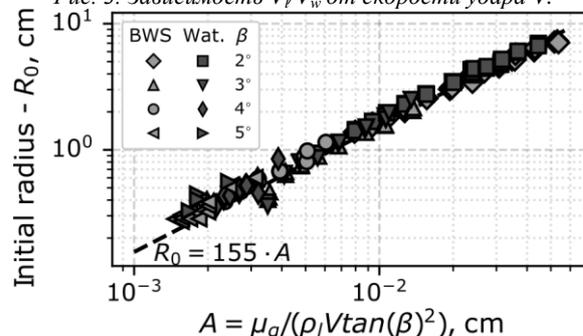


Рис. 4. Зависимость начального радиуса воздушной каверны  $R_0$  от параметра  $A$ .

### Список литературы

- Jain, U., Gauthier, A. & van der Meer, D. 2021a Total-internal-reflection deflectometry for measuring small deflections of a fluid surface. *Experiments in Fluids* 62 (11), 235.
- Thoroddsen, S.T., Etoh, T.G., Takehara, K., Ootsuka, N. & Hattsuji, Y. 2005 The air bubble entrapped under a drop impacting on a solid surface. *Journal of Fluid Mechanics* 545 (-1), 203.
- Hicks, P.D., Ermanyuk, E.V., Gavrilov, N.V. & Purvis, R. 2012 Air trapping at impact of a rigid sphere onto a liquid. *Journal of Fluid Mechanics* 695, 310–320.
- Ross, S. & Hicks, P.D. 2019 A comparison of pre-impact gas cushioning and Wagner theory for liquid-solid impacts. *Physics of Fluids* 31 (4), 042101.

Куйбин П.А.

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

Закрученные течения широко применяются в технике. На основе закрутки потока работают различного типа сепараторы, горелки, осушители, охладители и т.п. Для исследования закрученных течений используются методы экспериментального моделирования и вычислительной гидродинамики. Самый продуктивный подход в описании закрученных течений удастся реализовать, когда появляется возможность аналитического описания характеристик потока. Примеры аналитических моделей для описания закрученных течений можно найти в монографии [1]. В частности, предложена модель, позволяющая по осреднённым распределениям скорости определить параметры винтового вихря и оценить частоту его прецессии.

В недавней экспериментальной работе [2] найдены режимы закрученного потока, сопровождающиеся образованием пары винтообразных прецессирующих вихрей. В данной работе ставится цель построения аналитической модели для описания полученных экспериментальных данных.

Осреднённые по времени радиальные распределения окружной и осевой компонент скорости, измеренные в [2] с помощью PIV методики в вихревой камере диаметром 190 мм и высотой 500 мм (расход воды 11 м<sup>3</sup>/ч, параметр крутки  $S = 2,08$ ), на первый взгляд, свидетельствуют о существовании в камере колоннообразного вихря (см. рис.1). В то же время и визуализация, и фазово-осреднённые данные выявляют вращающиеся вихревые структуры. Такая картина оказывается возможной при композиции колоннообразного осесимметричного вихря и пары винтовых вихрей.

Следуя логике построения модели прецессирующего вихря [2], представим и в рассматриваемом случае поле осреднённых окружной ( $V_t$ ) и осевой ( $V_a$ ) компонент скорости в виде формул

$$V_t = \frac{1}{2\pi r} [\Gamma_0 f(r; a_0, l, \varepsilon_0) + 2\Gamma_1 f(r; a_1, l, \varepsilon_1)],$$

$$V_a = V_0 + \frac{1}{2\pi l} [\Gamma_0 f(r; a_0, l, \varepsilon_0) + 2\Gamma_1 f(r; a_1, l, \varepsilon_1)].$$

Здесь  $r$  – радиальная координата,  $h = 2\pi l$  – шаг винтовых вихрей,  $\Gamma_0$  и  $\Gamma_1$  – интенсивности колоннообразного и винтовых вихрей,  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_1$  – радиусы их ядер,  $a_1$  – радиус прецессии винтовых вихрей. Параметр  $a_0$  для колоннообразного вихря равен нулю.  $V_0$  – это значение осевой скорости на оси камеры. Заметим, что шаг винта одинаков для всех вихрей, т.к. уравнения гидродинамики с винтовой симметрией предполагают неизменность этого параметра по всему сечению камеры. Функция  $f$  такая же, как в [2] для одиночного винтового вихря (модель вихря с равномерным распределением завихренности в ядре). Её значение равно отношению площадей  $S_{\text{int}}/S_\varepsilon$ , где  $S_\varepsilon$  – площадь круга радиуса  $\varepsilon$ , являющегося сечением

вихревого ядра, а  $S_{\text{int}}$  – площадь пересечения этого круга с эллипсом, имеющим полуоси  $(r, r\sqrt{a^2 + l^2}/l)$ . Указанный эллипс соответствует проекции круга радиуса  $r$  на плоскость, перпендикулярную винтовой линии с радиусом  $a$  и шагом  $2\pi l$ .

Для описания конкретного распределения скоростей необходимо определить шесть параметров: ( $l, \Gamma_0, \Gamma_1, \varepsilon_0, \varepsilon_1, a_1$ ). Седьмой параметр –  $V_0$  возьмем непосредственно из эксперимента. Определять параметры вихрей будем из сопоставления модельных зависимостей с измеренными значениями скоростей. С этой целью составим квадратичную форму

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ 2\pi r_i V_i^{(e)} - \Gamma_0 f(r_i; a_0, l, \varepsilon_0) - 2\Gamma_1 f(r_i; a_1, l, \varepsilon_1) \right]^2 + \left[ 2\pi l (V_{ai}^{(e)} - V_0) - \Gamma_0 f(r_i; a_0, l, \varepsilon_0) - 2\Gamma_1 f(r_i; a_1, l, \varepsilon_1) \right]^2 \right\}$$

Здесь индексом  $i$  помечены координаты точек, в которых в эксперименте измерялась скорость, и сами значения скоростей. Два параметра,  $\Gamma_0$  и  $\Gamma_1$  входят в формулы для скоростей линейно, что позволяет в задаче о минимизации квадратичной формы выразить их через остальные параметры. Проведён анализ разрешимости задачи о единственном наборе параметров, обеспечивающих минимальное значение  $F$ . Модельные профили с найденными значениями параметров представлены на рис. 1 сплошными линиями.

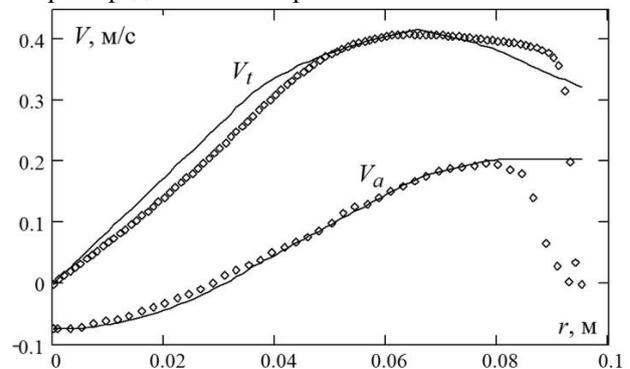


Рис. 1. Профили осредненных по времени окружной ( $V_t$ ) и осевой ( $V_a$ ) компонент скорости в эксперименте [2] (символы) и в аналитической модели (линии)

Таким образом достаточно простая аналитическая модель вихревой системы позволяет удовлетворительно описать измеренные в эксперименте распределения скоростей в потоке со сложной вихревой структурой.

#### Список литературы

1. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2003. 504 с.
2. Skripkin S.G., Gesheva E.S., Shtork S.I., Kuibin P.A. Precessing double helix in a swirling flow // Physics of Fluids. 2023. In print.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В КОНТУРЕ С ТЯЖЁЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Лобанов П.Д.<sup>1</sup>, Прибатурин Н.А.<sup>2</sup>, Курдюмов А.С.<sup>1</sup>, Светоносков А.И.<sup>1</sup>, Чинак А.В.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН  
ул. Б. Тульская, 52, Москва, 115191, Россия

Исследование процессов установления режима естественной циркуляции (ЕЦ) в контуре реакторной установки (РУ) с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) и, собственно, работы замкнутого контура реактора в режиме ЕЦ крайне важные задачи, поскольку их решения определяют основные положения обоснования безопасности реакторной установки со свинцовым теплоносителем. Эти задачи не могут быть решены без знания теплогидравлических характеристик течения металлического теплоносителя при работе контура в режиме ЕЦ. В замкнутом контуре без использования насосов естественная конвекция действует как единственный возможный способ движения жидкости.

Несмотря на высокий интерес к естественной циркуляции в РУ с тяжёлым жидким металлом (свинцовый расплав, свинцово - висмутовый сплав), её исследование при параметрах работы РУ с ТЖМТ всё ещё весьма ограничено. В исследовательских центрах Италии, Германии, Индии, Китая [1-4] выполнены и продолжаются исследования режима ЕЦ демонстрирующие особенности естественной циркуляции в контуре с одной циркуляционной петлей для эвтектики свинец - висмут. В ряде случаев эти эксперименты были обеспечены пре-тестовыми и пост-тестовыми расчётами.

Основное отличие нашей работы от ранее выполненных исследований связано с реализацией течения теплоносителя в нескольких циркуляционных контурах с одним источником тепловыделения, имитирующим ТВС и несколькими теплообменниками отводящими тепло.

Для выполнения экспериментальных исследований изготовлен лабораторный стенд, позволяющий проводить измерения с использованием нескольких циркуляционных петель и при различных условиях по начальной температуре теплоносителя, поступающего в ту или иную петлю. Для приближения конфигурации гидравлического тракта экспериментальной модели к контуру циркуляции РУ в состав экспериментального контура включены имитатор активной зоны, имитатор верхней камеры, имитатор системы аварийного сброса тепла. В качестве теплоносителя в экспериментальной модели используется эвтектический сплав свинец-висмут.

При разработке экспериментальной модели контура с ЕЦ было обеспечено соблюдение основных критериев подобия, характеризующих режим естественной циркуляции с соответствующими значениями критериев для реальной РУ.

В результате экспериментальных исследований получены следующие результаты:

- данные по эволюции температуры теплоносителя в различных элементах контура (имитаторе ТВС, теплообменнике, трубопроводах) при развитии естественной циркуляции;
- данные по влиянию мощности остаточного тепловыделения на изменение температуры теплоносителя в циркуляционном контуре.

Было исследовано влияние мощности источника нагрева, влияние расхода охлаждающей жидкости в теплообменнике и влияние гидравлического сопротивления контура на интенсивность развития естественной циркуляции.

Эксперименты показали, что высокое тепловое расширение теплоносителя всегда гарантирует лёгкое установление в контуре естественной циркуляции. Фактически, требуется меньше минуты, чтобы получить существенную скорость движения теплоносителя. За полчаса может быть установлен устойчивый процесс. Спонтанная неустойчивость прямой циркуляции никогда не наблюдалась при различной входной мощности и установленных уровнях охлаждения. Влияние источника тепла и отвода тепла на расход естественной конвекции, может быть отражено в соотношении между расходом и перепадом температуры.

Полученные данные использованы для верификации расчётных моделей и кодов, расширения области верификации CFD-кодов с целью подтверждения их использования при обосновании безопасности РУ с ТЖМТ в режимах работы на естественной циркуляции.

### Список литературы

1. Grishchenko D., Papukchiev F., Liud C., Geffray C., Polidorie M., Kp K., Jeltsov M., Kudinov P. TALL-3D open and blind benchmark on natural circulation instability // Nuclear Engineering and Design 358 (2020) 110386
2. Di Piazza I., Angelucci M., Marinari R., Tarantino M., Martelli D. Thermo-fluid dynamic transients in the NACIE-UP facility // Nuclear Engineering and Design, Volume 352, October 2019, 110182
3. Naphade P., Borgohain A., Thundil R., Karuppa Raja, Maheshwari N. Experimental and CFD Study on Natural circulation Phenomenon in Lead Bismuth Eutectic Loop // Procedia Engineering 64 (2013) 936 – 945.
4. Leitai Shi, G.H. Su, Fengjie Zhu, Tan Bing, Yandong Hou, Shiyang Wei, Chenglong Wang, Wenxi Tian, Suizheng Qiu, Junmei Wu. Experimental study on the natural circulation capability and heat transfer characteristic of liquid lead bismuth eutectic // Progress in Nuclear Energy 115 (2019) 99–106.

## МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЕЛ НУССЕЛЬТА ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ РАДИАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛОСКОМ СЛОЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА, ПОДОГРЕВАЕМОГО СНИЗУ

Локтионов В.Д.<sup>1,2</sup>, Мухтаров Э.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», ул. Красноказарменная 14, стр. 1, Москва, 111250, Россия

<sup>2</sup> Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электрических станций, ул. Святого Константина 6, Электрогорск, Московской обл., 142530, Россия

В работе представлены и обсуждаются разработанные модифицированные соотношения для чисел Нуссельта на граничных (боковой и нижней) поверхностях плоского слоя расплава стали/железа, подогреваемого снизу, при неравномерном радиальном распределении температуры в слое в условиях естественной конвекции расплава при высоких числах Рэлея. Анализ полученных модифицированных соотношений для чисел  $Nu$  позволил оценить значения внутренних коэффициентов теплообмена в зависимости от температурных условий на граничных поверхностях слоя расплава, что является крайне важным при анализе и оценке тепловых нагрузок, воздействующих на корпус ядерного реактора (КР) в случае тяжелых аварий (ТА) и формирования высокотемпературной (свыше  $\sim 2000$  °С) стратифицированной ванны из расплавленных материалов активной зоны. При подобной стратификации расплава происходит нагрев верхнего металлического (сталь, цирконий) слоя расплава по его нижней поверхности со стороны нижерасположенного тепловыделяющего оксидного (диоксида урана и циркония) расплава. Такая конфигурация ванны расплава может привести к эффекту фокусирования на боковой поверхности металлического слоя расплава тепловой нагрузки (т.н. «тепловой нож») [1], воздействующей на КР и приводящей к его нагреву, оплавлению и разрушению в течение ТА.

Возможность оперативного и точного прогнозирования величины тепловой нагрузки на КР является крайне актуальной задачей при анализе ТА. Как правило, для оценки чисел  $Nu$  на поверхностях слоя расплава используются известные соотношения «Globe & Dropkin» (1959 г.) и «Churchill & Chu» (1975 г.), которые были получены для условий существенно отличающихся от тех, что имеют место при ТА. Также, данные и подобные им соотношения для  $Nu$  не позволяют учесть радиальную неравномерность температурного распределения в слое расплава и его геометрические размеры (аспектное число), что является причиной значительных погрешностей [2] при определении условий теплообмена на граничных поверхностях слоя и является критичным при реализации концепции удержания расплавленных материалов внутри корпуса ядерного реактора [1] при ТА.

В разработанных модифицированных соотношениях для чисел  $Nu$  на боковой [2] и нижней поверхностях слоя расплава используются как традиционные (число  $Ra$ ), так и дополнительные параметры, учитывающие температурные условия на границах

слоя (в т.ч. боковой), а также его геометрические характеристики.

Для определения неизвестных коэффициентов в модифицированных соотношениях использовались результаты нескольких серий численных экспериментов, выполненных с использованием отечественного CFD кода «ANES». Анализ полученных соотношений для чисел  $Nu$  и результатов параметрического анализа показали хорошую точность и предсказательную способность разработанных модифицированных соотношений для  $Nu$  в диапазоне значений чисел Рэлея от  $\sim 10^6$  до  $10^{12}$  и значений чисел  $Nu$  до  $\sim 700$ . Результаты параметрического анализа показали существенное влияние разницы между значениями температур верхней и боковой поверхностей слоя на величину чисел  $Nu$  на границах рассматриваемого слоя. Увеличение разницы между осредненными значениями температур верхней и боковой поверхностей слоя приводит к значительному (в разы! – в ряде случаев) увеличению значений чисел  $Nu$  и тепловых нагрузок на поверхностях слоя по сравнению с аналогичными значениями, определенными с помощью известных соотношений «Globe & Dropkin» и «Churchill & Chu».

Полученные модифицированные соотношения для чисел  $Nu$  могут использоваться при оценке тепловых нагрузок на корпус ядерного реактора при ТА, а также в других аналогичных задачах (жидкометаллические теплоносители, расплавы солей, выращивание кристаллов и др.), где имеется радиальная неравномерность температурного распределения в плоском слое жидкости/расплава, подогреваемого снизу, и различных температурах на его границах.

Для подтверждения работоспособности разработанных модифицированных соотношений для чисел  $Nu$  и полученных результатов необходимо постановка и проведение дополнительных экспериментальных исследований.

### Список литературы

1. Theofanous, T.G., Liu, C., Additon, S., Angelini, S., Kymäläinen, O., Salmassi, T., 1996. Invesel Coolability and Retention of a Core Melt. DOE/ID-10460. U.S. Department of Energy Vol. 1.
2. Локтионов В.Д., Мухтаров Э.С. «Влияние условий теплообмена на граничных поверхностях подогреваемого снизу плоского слоя расплава металла на характер течения расплава в условиях естественной конвекции при высоких числах Рэлея применительно к решению проблемы удержания расплава внутри корпуса ядерного реактора при тяжелой аварии»/Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 17–22 октября 2022 г.): в 2 т. Т.1 — М.: Издательство МЭИ, 2022. — с. 169- 170.

## О ВЛИЯНИИ МАСШТАБИРОВАНИЯ ПО МОЩНОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ПРАНДТЛЯ В ОДИНОЧНОЙ ТРУБЕ ЛЕОНТЬЕВА

Макаров М.С.<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

e-mail: msmakarov@itp.nsc.ru

Газодинамическое энергоделение в трубе Леонтьева – перераспределение полной температуры между частями газового потока, протекающего через сверхзвуковое сопло и сопряженный с соплом дозвуковой канал [1,2]. В работах [3,4,5] исследовалась эффективность энергоделения в трубе Леонтьева с оребренной разделительной стенкой. Такая конфигурация показала в 5 раз большую эффективность энергоделения по адиабатному КПД в сравнении с трубой Леонтьева с гладкой разделительной стенкой. Однако сравнение проведено на трубах с одинаковой геометрией сверхзвукового сопла. При постоянном давлении и температуре в ресивере расход газовой смеси через сверхзвуковой канал в этом случае неизменный, а значит неизменна и максимальная мощность (холодопроизводительность) трубы Леонтьева. Вопрос о влиянии масштабирования трубы Леонтьева по мощности на эффективность энергоделения не исследовался.

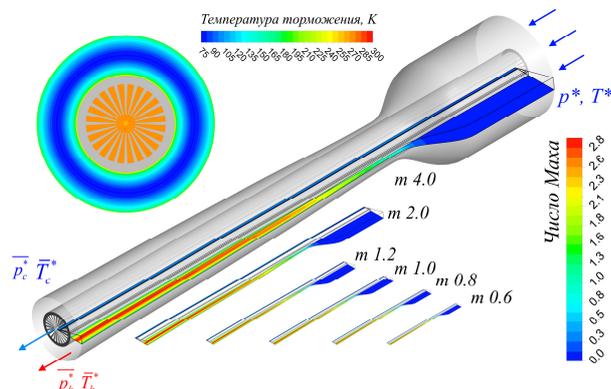


Рис. 1. Масштабирование одиночной трубы Леонтьева с изменением расхода гелий-ксеноновой смеси и мощности:  $p^* = 7.5$  атм.,  $T^* = 295$  К.

В данной работе представлены результаты численного моделирования эффективности энергоделения гелий-ксеноновой газовой смеси с массовой концентрацией гелия 5% в одиночных трубах Леонтьева при изменении геометрического масштаба. В качестве исходной геометрии использована геометрия "короткой" трубы Леонтьева из работы [3], как наиболее эффективной в диапазоне мощности до 150 Вт. Масштабный фактор задавался по следующему ряду: 0.6; 0.8; 1.0; 1.2; 2.0; 4.0. Таким образом, перекрывался диапазон мощности трубы Леонтьева от 67 Вт до 1.8 кВт. Схемы труб, геометрии расчетной области, граничные условия представлены на рис. 1. Для исходной геометрии длина участка формирования сверхзвукового потока составляет 100 мм, сопло имеет длину 75 мм. Максимальное число Маха в ядре сверхзвукового потока составляет 2.73. Давле-

ние и температура на входе в канал энергоделения составляли 7.5 атм. и 295 К, соответственно.

На рис. 2 приведены результаты расчетов адиабатного КПД в зависимости от коэффициента расхода газового потока в дозвуковом канале.

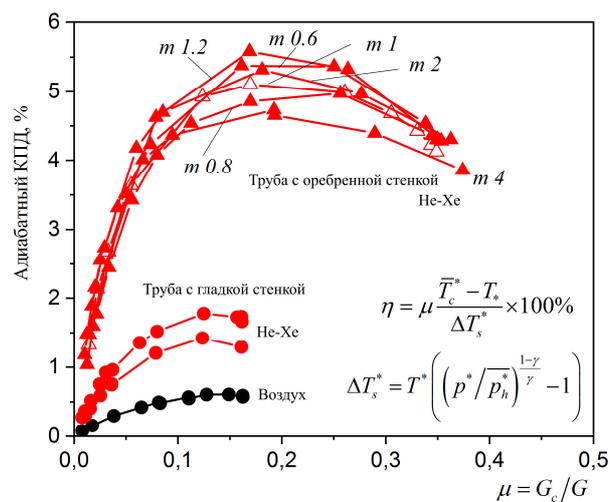


Рис. 2. Адиабатный КПД при масштабировании одиночной трубы Леонтьева по мощности:  $p^* = 7.5$  атм.,  $T^* = 295$  К.

Показано, что в исследованном диапазоне мощности эффективность энергоделения в трубе Леонтьева с оребренной разделительной стенкой практически не изменяется. Максимум адиабатного КПД наблюдается при коэффициенте расхода около 0.2 и составляет 5.5%.

### Список литературы

1. Burtsev S.A., Leontiev A.I. Study of the influence of dissipative effects on the temperature stratification in gas flows (review) // High Temperature. – 2014. – V. 52(2). – p. 297–307.
2. Leontiev I.A., Zditovets A.G., Vinogradov Y.A., Strongin M.M., Kiselev N.A. Experimental investigation of the machine-free method of temperature separation of air flows based on the energy separation effect in a compressible boundary layer // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2017. – V. 88. – p. 202–219.
3. Makarov M.S., Makarova S.N. The influence of the supersonic nozzle length on the efficiency of energy separation of low-Prandtl gas flowing in the finned single Leontiev tube // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V.1675. – P.012011. – DOI 10.1088/1742-6596/1675/1/012011.
4. Makarov M.S., Makarova S.N. Numerical simulation of energy separation of low-Prandtl gas mixture flowing in the finned single Leontiev tube // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V.1359. – P.012022.
5. Makarov M.S., Makarova S.N., Naumkin V.S. Energy separation efficiency of air and helium-xenon mixture flowing in the single Leontiev tube with finned wall // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1128. – P. 012018.

Работа выполнена в рамках  
государственного задания ИТ СО РАН

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ В ГАЗОВИХРЕВОМ БИОРЕАКТОРЕ С ПЛАВАЮЩЕЙ ШАЙБОЙ

Наумов И.В., Скрипкин С.Г., Тинтулова М.В., Шарифуллин Б.Р.

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

e-mail: naumov@itp.nsc.ru

Исследование структуры течения в газовихревом биореакторе имеет большое значение для разработки актуальных методов выращивания клеточных культур [1]. Определение оптимальных условий культивирования особенно важно в том случае, когда такие параметры среды, как плотность и вязкость, существенно изменяются при росте культуры в биореакторе, что соответственно приводит к изменению характерных режимов течения. Так как выращиваемая культура в большинстве случаев не прозрачна, определить режим течения визуально невозможно. Возникает проблема установки оптимальных режимов течения без высокотурбулентных пульсаций и застойных зон. Поэтому детальное исследование закономерностей режимов течения в газовихревом реакторе имеет большой фундаментальный и прикладной интерес. Целью данной работы является определение закономерностей организации вихревого течения рабочей жидкости в газовихревом биореакторе с плавающей шайбой на границе раздела при различных параметрах крутки активатора.

Экспериментальные исследования динамики течения проводились в универсальном газо-вихревом биореакторе объемом 8,5 л (диаметр  $D=190$  мм, высота  $H=300$  мм) со свободно плавающей на его поверхности шайбой, стабилизирующей движение рабочей жидкости (рис. 1а). Активатор генерирует вихревое движение воздуха с частотой вращения  $\Omega$  до 1500 об/мин. В качестве рабочих жидкостей, перекрывающих основные классы культур клеток и микроорганизмов по параметрам плотности и вязкости, использовались дистиллированная вода (плотность  $\rho_w=999$  кг/м<sup>3</sup>, кинематическая вязкость  $\nu_w=1$  мм<sup>2</sup>/с) и водно-глицериновый раствор (объемная доля глицерина 65%,  $\rho_g=1150$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu_g=15$  мм<sup>2</sup>/с). Основные экспериментальные исследования были выполнены при заполнении реакторной емкости рабочей жидкостью на 50%. Методом Particle Image Velocimetry установлены закономерности вихревого движения модельной среды в зависимости от её объема и интенсивности вращения активатора, генерирующего вихревое движение в воздухе. На рис. 1(б) представлена половина скалярного поля осевой компоненты скорости в жидкости при  $\Omega = 1200$  об/мин, полученного методом PIV в вертикальном сечении, где левый край изображения соответствует оси реакторной емкости, а правый край – периферии.

Показано, что вблизи оси биореактора формируется восходящая закрученная струя, а, при определенных параметрах вихревого движения, в осевой области формируется пузыревидный распад вихря [2]. Установлено, что наблюдаемая вихревая структура и её динамика при увеличении интенсивности закрутки потока совпадают со структурой замкнутого вихревого течения в цилиндрическом контейнере как

для одножидкостной конфигурации, так и для системы двух несмешиваемых жидкостей.

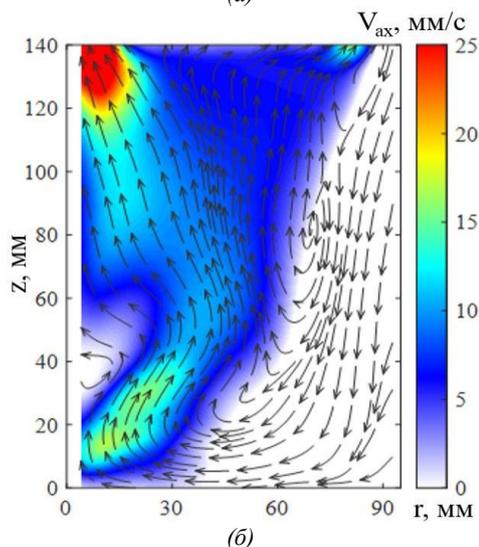
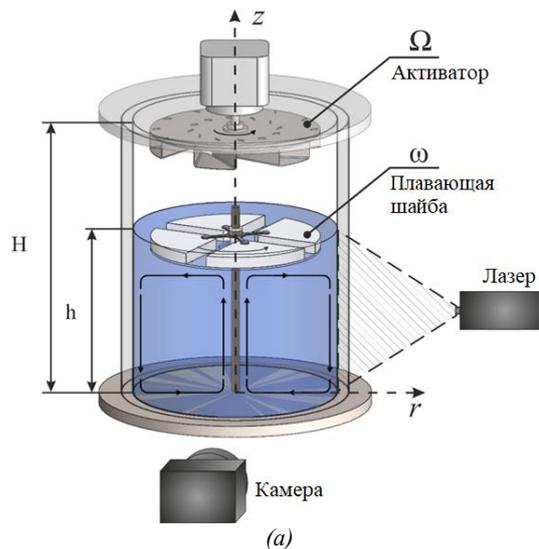


Рис. 1. Схема экспериментального стенда (а), пример скалярного поля осевой компоненты скорости ( $V_{ax}$ ) в вертикальном сечении при  $\Omega = 1200$  об/мин,  $Re \approx 670$  (б).

### Список литературы

1. Мертвецов Н., Рамазанов Ю., Репков А., Дударев А.Н., Кислых В. Газовихревые биореакторы "Биок": Использование в современной биотехнологии // Новосибирск: Новосибирское отделение издательства "Наука" (2002), 118 с.
2. 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. 18, 2200644. <https://doi.org/10.1002/biot.202200644>

Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00083-П). Ссылка на информацию о проекте: <https://rscf.ru/project/22-19-35009/>.

## РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ОБРАЗЦА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КЕРАМИКИ В ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ

Астапов А.Н.<sup>1</sup>, Жестков Б.Е.<sup>2</sup>, Погодин В.А.<sup>1</sup>, Ртищева А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

e-mail: al.rtisheva@mail.ru

Совершенствование расчётно-экспериментальных методов исследования свойств теплозащитных материалов при воздействии высокотемпературной плазмы необходимо для создания перспективных высокоскоростных летательных аппаратов.

Настоящая работа посвящена изучению особенностей теплообмена образца высокотемпературной керамики на основе SiO<sub>2</sub> в потоке воздушной плазмы и выявлению вклада катализа в общие тепловые поступления к его поверхности.

В ходе экспериментального исследования, проводимом в установке ВАТ-104 ЦАГИ, цилиндрический образец, радиусом  $r_{обр} = 14,775$  мм и высотой  $h_{обр} = 5,83$  мм, установленном на державке, помещался в рабочую часть на расстоянии 56 мм от выходного сечения сопла под углом атаки  $\alpha = 0$ . Образец выступал от торцевой поверхности державки на 1,58 мм. Оптическими методами регистрировалось изменение температуры на поверхности образца с течением времени.

Для уточнения условий эксперимента проводилось численное моделирование внешнего обтекания и теплообмена с учётом теплопроводности образца. При этом использовался метод разделения этих задач, поскольку в ходе эксперимента течение можно считать стационарным [1].

В ударном слое перед моделью реализовались достаточно низкие значения статического давления ( $p \approx 500 - 1000$  Па), поэтому моделировалось ламинарное течение восьмикомпонентной химически реагирующей газовой смеси (O<sub>2</sub>; N<sub>2</sub>; O; N; NO; O<sup>+</sup>; NO<sup>+</sup>; e<sup>-</sup>) в рабочем тракте ВАТ-104 [2, 3]. Это позволило получить коэффициент теплоотдачи для полностью каталитической и некаталитической поверхности:

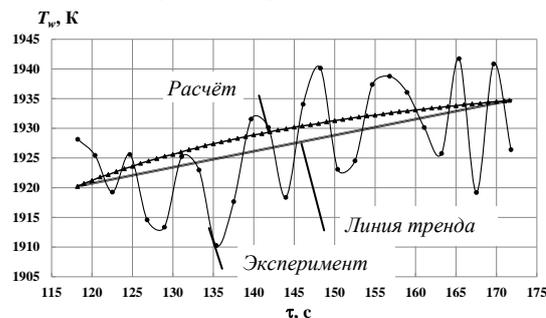
$$\alpha_{кат} = \frac{q_{wкат}}{T_e - T_{wкат}}, \alpha_{некат} = \frac{q_{wнекат}}{T_e - T_{wнекат}}, \quad (1)$$

где  $q_{wкат(некат)}$  – плотность теплового потока;  $T_{wкат(некат)}$  – температура поверхности (задание граничных условий радиационного теплообмена, а также условий каталитической/некаталитической поверхности);  $T_e$  – температура внешней границы пограничного слоя, была принята равной адиабатной температуре стенки (задание граничного условия адиабатной стенки).

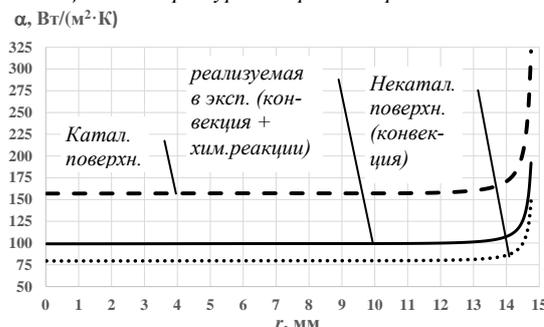
Коэффициент  $\alpha_{некат}$  представляет собой коэффициент теплоотдачи конвекцией. Реальное значение  $\alpha$  с учётом вклада химических реакций рекомбинации в общие теплоступления:  $\alpha_{некат} \leq \alpha \leq \alpha_{кат}$ .

Далее моделировался нестационарный нагрев образца с учётом известной теплофизики материала, но неизвестного значения коэффициента каталитической активности его поверхности  $K_w$ . Методом последовательных приближений находилось такое распределение значений коэффициента теплоотдачи

вдоль поверхности образца, которое обеспечило эволюцию температуры его поверхности, полученную в результате эксперимента (рис. 1).



а) Эволюция температуры в передней критической точке



б) Распределение значений коэффициента теплоотдачи вдоль лобовой поверхности образца

Рис. 1. Основные результаты, полученные для режима ВАТ-104:  $p_0 = 10162$  Па;  $T_0 \approx 8500$  К;  $M \approx 4$

Таким образом, за время эксперимента значение плотности теплового потока менялось незначительно и составило вблизи передней критической точки  $q_w = 67,5$  Вт/см<sup>2</sup>. Результаты расчёта внешнего обтекания также позволили определить плотность газовой смеси у поверхности образца и энтальпию рекомбинации:  $\rho = 1,125$  г/м<sup>3</sup>;  $h_{рек} = 6,98$  МДж/кг [3]. Расчёт коэффициента каталитической активности вблизи передней критической точки показал, что  $K_w = 17,07$  м/с.

Полученные результаты составят основу нового расчётно-экспериментального метода определения каталитической активности материалов.

Исследование выполнено за счёт гранта РФФ  
№ 22-19-00352.

### Список литературы

1. Drozdov.S.M., Rtishcheva A.S. Journal of Physics: Conference Series.-2020.-1683.-№ 022030
2. Roop N. Gupta R., Yos J., Thompson R. A review of reaction rates and thermodynamic and transport properties for the 11-species air model for chemical and thermal nonequilibrium calculations to 30000 K // NASA Technical Memorandum 101528, 1989.
3. McBride B, Gordon S., Reno M. Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species // NASA Technical Memorandum 4513, 1993.

## ПОВЫШЕНИЕ КОМПАКТНОСТИ ПРОТИВОТОЧНОГО ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Ряжских А.В., Краснов А.А., Ряжских В.И.

Воронежский государственный технический университет,  
ул. 20-летия Октября, 84, Воронеж, 394006, Россия

Увеличение теплопередачи в теплообменнике позволяет уменьшить его размер при сохранении тепло(холодо)производительности. Одним из способов интенсификации теплообмена является использование наножидкостей в качестве теплоносителей [1], обладающих повышенной теплопроводностью [2]. В связи с этим предлагается оценка величины уменьшения габаритов противоточного пластинчатого теплообменника при применении наножидкостей, основанная на модельных представлениях идеального вытеснения для потоков теплоносителей [3] в виде краевой задачи:

$$dT_1/dZ = K_1(T_1 - T_2); \quad (1)$$

$$dT_2/dZ = K_2(T_1 - T_2); \quad (2)$$

$$T_1(1) = 1, T_2(0) = 0, \quad (3)$$

где  $Z = z/l$ ;  $T_{1,2} = (t_{1,2} - t_c)/(t_h - t_c)$ ;  $K_{1,2} = Fk/(v_{1,2}S_{1,2}\rho_{1,2}c_{p1,2})$ ;  $z, l$  — текущая аксиальная координата и длина теплообменника, м;  $t_{1,2}, t_h, t_c$  — локальная температура теплоносителей (индексы 1 и 2 соответственно для "горячего" и "холодного"), температуры "горячего" и "холодного" теплоносителей на входе в теплообменник, К;  $F, S_{1,2}$  — площади теплопередачи и проходных сечений каналов, м<sup>2</sup>;  $v_{1,2}, \rho_{1,2}, c_{p1,2}$  — средние скорости потоков, плотности и теплоёмкости теплоносителей, м/с; кг/м<sup>3</sup>; Дж/(кг·К).

Получено аналитическое решение системы (1) - (3):

$$T_1(Z) = A \exp[-(K_2 - K_1)Z] + \frac{AK_2}{K_2 - K_1} \{1 - \exp[-(K_2 - K_1)Z]\};$$

$$T_2(Z) = \frac{AK_2}{K_2 - K_1} \{1 - \exp[-(K_2 - K_1)Z]\};$$

где  $A = \left\langle \exp[-(K_2 - K_1)] - \frac{K_2}{K_2 - K_1} \{ \exp[-(K_2 - K_1)] - 1 \} \right\rangle^{-1}$ .

Сделано предположение, что  $v_1 = v_2, S_1 = S_2$ , теплоносители 1 и 2 реологически одинаковы, а также их теплопроводности и теплоёмкости. Коэффициенты теплоотдачи вычислены по формулам Михеева для ламинарного и турбулентного режимов течения:

$$Nu = 0.15Re^{0.33}Pr^{0.43};$$

$$Nu = 0.021Re^{0.8}Pr^{0.43},$$

где  $Nu = \alpha d/\lambda$ ;  $Re = vd/\nu$ ;  $Pr = \nu\rho c_p/\lambda$ ;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $d$  — гидравлический диаметр, м;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Расчёты по этому варианту сравнивались, когда  $\lambda_1 = 1.4\lambda_2$  ("горячий" теплоноситель заменили на наножидкость вода - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [4]). Для первого варианта  $K_1 = K_2 = 1$ , для второго варианта  $K_1 = 1.08, K_2 = 1$  (рис.1). Такая замена дала уменьшение длины теплообменника на 5%.

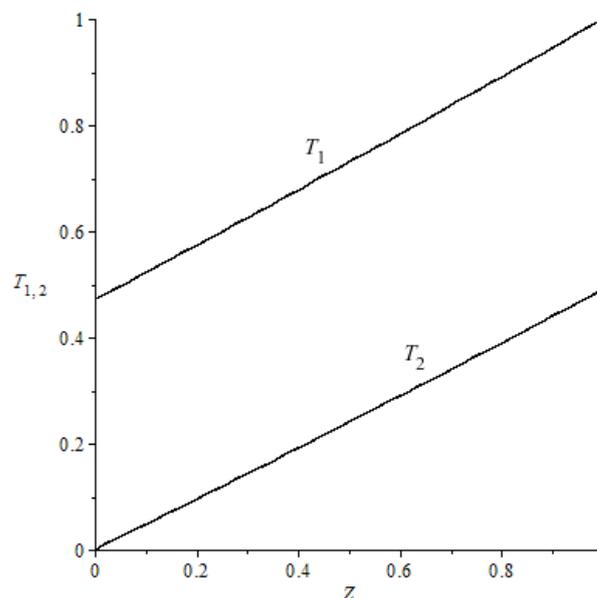


Рис.1. Аксиальное распределение температур теплоносителей.

### Список литературы

1. Mousa M.H., Mikjkovic N., Nawas K. Review of heat transfer enhancement techniques for single phase flows // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – v.137. – 110566.
2. Pandya N.S., Shahb H., Molana M., Tiwari A.K. Heat transfer enhancement with nanofluids in plate heat exchangers: A comprehensive review // European Journal of Mechanics. B/Fluids. – 2020. – v.81. – pp.173-190.
3. Emhemed A.A., Mamat R.B., Hanafi D. Mathematical modeling of industrial heat exchanger system // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – v.229-231. – pp.2122-2124.
4. Eastman J.A., et al. Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticle // Applied Physics Lett. – 2001. – v.78. – №6. – p.718.

Сахнов А.Ю., Брызгалов К.В., Наумкин В.С., Лебеда К.С.

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

В статье [1] представлены результаты экспериментального исследования течения воздуха в сужающемся плоском канале в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re_0 = (1.58 - 4.34) \times 10^4$ , рассчитанного через скорость и высоту канала во входном сечении. Исходя из заданного угла наклона верхней стенки канала  $\varphi = 2.5^\circ$  и вышеуказанных значений числа Рейнольдса, максимальное значение параметра ускорения  $K = \mu/\rho U_x (dU_x/dx) = \text{tg}(\varphi)/Re_0$  составило  $(1.0 - 2.76) \times 10^{-6}$ . Интенсивность турбулентности на входе в сужающийся канал составляла 2%. Тепловой поток через нижнюю стенку канала был постоянным, и его значение не превышало  $1 \text{ кВт/м}^2$ .

В настоящей работе было проведено численное трёхмерное моделирование условий течения, основанного на вышеописанном эксперименте при  $Re_0 = 1.58 \times 10^4$  (рис.1) и значениях теплового потока через нижнюю стенку канала  $0.1, 3.0$  и  $6.0 \text{ кВт/м}^2$ . Моделирование проводилось в пакете OpenFOAM [2] с применением RANS подхода (решатель rhoPimpleFoam). Для замыкания уравнений Навье-Стокса была использована  $k-\omega$  SST модель турбулентности [3].

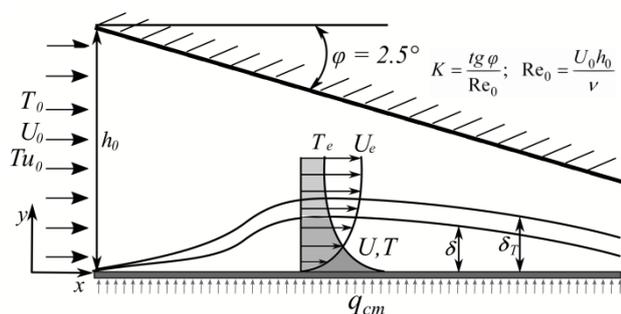


Рис. 1. Схема моделируемого течения.

Поскольку для представленного исследования основной интерес представляет область вблизи нижней теплообменной стенки, то расчётная сетка имела шестикратное сжатие к нижней стенке с количеством ячеек 7 миллионов:  $x \times y \times z = 1000 \times 100 \times 70$ . Данная сетка выбрана на основе теста на сеточную сходимость. Также было проведено сравнение профилей продольной скорости с данными эксперимента [1], показавшее хорошую корреляцию расчётных и экспериментальных данных.

На рис. 2 приведены зависимости теплового числа Стантона от локального числа Рейнольдса, рассчитанного по продольной координате и продольной скорости, определённой при  $y = h/2$ . До числа Рейнольдса  $10^4$  расчётные данные при  $q_{cm} = 0.1 \text{ кВт/м}^2$  заметно превышают экспериментальные значения числа Стантона. Такое отличие объясняется несколько различными начальными условиями эксперимента и численного моделирования. В экспериментальной установке «на входе в канал бы-

ло установлено плавное в вертикальной плоскости входное устройство» [1], тогда как в численном моделировании задавалось постоянное значение скорости по всему входному сечению канала. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса данные численного моделирования при  $q_{cm} = 0.1 \text{ кВт/м}^2$  хорошо коррелируют с результатами эксперимента [1].

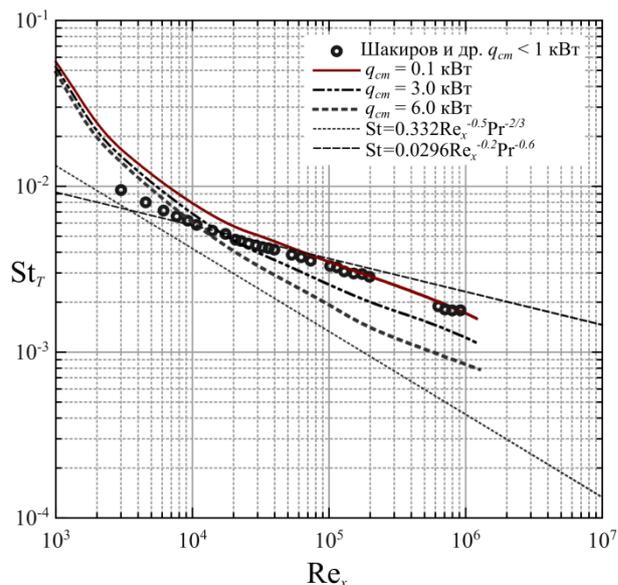


Рис. 2. Влияние теплового потока на теплообмен вблизи нагретой стенки сужающегося канала.

С увеличением теплового потока через нижнюю стенку канала значения теплового числа Стантона снижаются во всём рассмотренном диапазоне числа Рейнольдса, приближаясь к зависимости, описывающей теплообмен в ламинарном пограничном слое Блазиуса. Причиной такой тенденции является возникновение максимума продольной скорости внутри нижнего пограничного слоя и, как следствие, подавления турбулентности в этой области. В свою очередь снижение турбулентности приводит к уменьшению интенсивности теплообмена.

## Список литературы

1. Р.Р. Шакиров, И.А. Давлетшин, Н.И. Михеев Кинематическая структура течений и теплоотдача в плоских диффузорном и конфузорном каналах // Теплофизика и аэромеханика, 2022. Т.29. № 5. С. 799 — 805.
2. OpenFOAM The Open Source CFD Toolbox User Guide, 2014. — 212 p.
3. F.R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. In Proceedings of the fourth international symposium on turbulence, heat and mass transfer, P. 625–632, Antalya, Turkey, 2003. Begell House.

Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 23-29-00210,  
<https://rscf.ru/project/23-29-00210/>

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ СОПЛА НА ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В БЛИЖНЕЙ ОБЛАСТИ СВОБОДНОЙ СТРУИ**Сорокин М.И.<sup>1,2</sup>, Федотов И.А.<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

Свободные струи являются предметом многих теоретических и экспериментальных исследований [1, 2]. Такие исследования позволяют понять механику массопереноса струйных течений для их применения в химических реакторах, газотурбинных и ракетных двигателях [3]. Известно, что перемешивание турбулентной струи с окружающей средой зависит от двух факторов: крупномасштабное перемешивание и мелкомасштабные пульсации скорости. Большой интерес представляет динамика развития неустойчивых режимов, приводящих к возникновению крупномасштабных когерентных структур [4]. Характер перехода к крупномасштабным когерентным структурам в значительной степени зависит от геометрии выходного отверстия сопла, числа Рейнольдса, а также от профиля скорости на выходе из сопла. Изменением вышеуказанных параметров с применением методов активного и пассивного управления можно добиться интенсификации процессов тепло-массопереноса. Так, во многих технических приложениях управление интенсивностью перемешивания осуществляется изменением геометрии выходного отверстия сопла. В отличие от круглых сопел, сопла с геометрией сечения в виде многоугольников обеспечивают более интенсивное мелкомасштабное перемешивание вблизи углов и дальше по потоку за счёт более быстрого разрушения вихревого кольца и, следовательно, более быстрого перехода к турбулентности [5].

Ключевым фактором, позволяющим исследовать динамику вихревых структур, стало развитие методов визуализации и скоростных измерений, появление скоростных импульсных лазеров и КМОП камер, способных регистрировать изображения на частоте более 10 кГц.

В представленной работе проводилась визуализация вихревых структур для сопел квадратной, прямоугольной и звездообразной формы, изготовленных методом аддитивных технологий (3D печати). Для создания ударного профиля скорости струи на выхо-

де из сопла перед ним был установлен расширенный участок, служащий для выравнивания потока. Подвод воздуха осуществлялся через трубу диаметром 20 мм с последующим внезапным расширением до 160 мм, после чего были установлены система решеток, хонейкомб, сетки и конфузор с переходом на нужную форму сечения сопла.

Для визуализации вихревых структур в поток добавлялись трассеры (частицы глицериновой взвеси). Для регистрации изображений применялась высокоскоростная КМОП камера Photron Nova S12 (1024×1024 пикселей). Подсветка потока осуществлялась импульсным светодиодным источником освещения.

В результате проведенных исследований были получены картины течения для струй, выходящих из сопел с квадратной, прямоугольной и звездообразной формой выходного сечения. По полученным данным проведен анализ влияния геометрии сопла на динамику вихревых структур в ближней области свободной струи.

## Список литературы

1. Quinn W. R. Development of a large-aspect-ratio rectangular turbulent free jet //AIAA journal. – 1994. – Т. 32. – №. 3. – С. 547-554.
2. Quinn W. R. Turbulent mixing in a free jet issuing from a low aspect ratio contoured rectangular nozzle //The Aeronautical Journal. – 1995. – Т. 99. – №. 988. – С. 337-342.
3. Knowles K., Saddington A. J. A review of jet mixing enhancement for aircraft propulsion applications //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. – 2006. – Т. 220. – №. 2. – С. 103-127.
4. Vouros A. P. et al. Near field vorticity distributions from a sharp-edged rectangular jet //International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2015. – Т. 51. – С. 383-394.
5. Grinstein F. F. Vortex dynamics and entrainment in rectangular free jets //Journal of Fluid Mechanics. – 2001. – Т. 437. – С. 69-101.

*Работа поддержана РНФ №22-79-10246*

Стрекалов З.З.<sup>1</sup>, Есин С.Б.<sup>1</sup>, Сухоруков Ю.Г.<sup>1</sup>, Егоров П.В.<sup>1</sup>,  
Миронова М.В.<sup>1</sup>, Михайлов В.В.<sup>2</sup>, Арсеньев С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО Научно-производственная объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова (ОАО "НПО ЦКТИ"),  
ул. Атаманская д.3/6, Санкт-Петербург, 191167, Россия

<sup>2</sup> Таганрогский котлостроительный завод «Красный котельщик» (ПАО ТКЗ "Красный котельщик"),  
ул. Ленина, д. 220, Ростовская область, г. Таганрог, 347910, Россия

Целью исследования являются сепарационные жалюзи, проверка их работоспособности, верификация расчётов моделирования выбранной конструкции сепарационных жалюзи, формирование выводов и рекомендаций для вновь разрабатываемых конструкций.

Сепарационные жалюзи предназначены для отделения влаги и осушки пара, поступающего после цилиндра высокого давления турбины, работающей на насыщенном паре.

Жалюзи имеют волнообразный профиль в виде синусоиды. Для более эффективного осушения пара жалюзи имеют влагоулавливающие устройства для захвата влаги (см. Рис. 1).

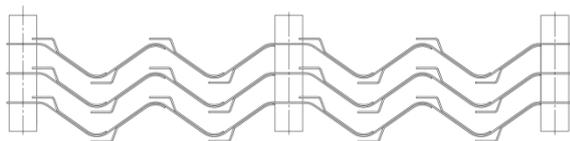


Рисунок 1. Общий вид жалюзи.

Принцип работы жалюзийного сепаратора основан на разном изменении траекторий движения частиц воды и потока пара при проходе через изгибы канала по причине различия в инерции фаз. При проходе через жалюзи влага оседает на стенках волнообразных листов и внутри влагоулавливающих устройств, и под воздействием гравитации стекает в нижнюю часть конструкции.

Для подтверждения технических характеристик сепарационного устройства был разработан испытательный стенд. Пароводяная среда для испытаний была заменена водо-воздушной с пересчётом через критерии подобия. Основным и наиболее распространённым при моделировании является критерий Рейнольдса. Схема стенда приведена на рис. 2.

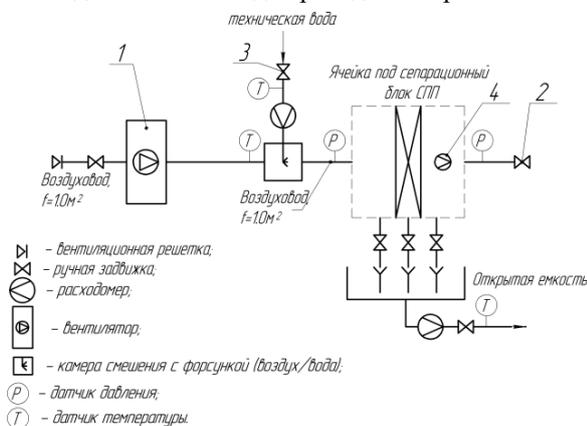


Рисунок 2. Схема стенда.

Сепарационный стенд представляет собой длинный металлический воздухопровод. С одной стороны, к воздухопроводу через компенсатор и конфузор подключён вентилятор. С другой стороны, находится сепарационное устройство с установленным в нём блоком сепарационной жалюзи. На удалении примерно 2 м от начала сепарационного устройства, установлены специальные форсунки для распыления воды. Для нагнетания воздуха был использован вентилятор. Для сбора влаги и оценки количественной эффективности сепаратора, предусмотрены три мерные емкости.

Согласно [4] максимальная эффективность сепарационного модуля достигается в диапазоне 4-5 м/с. Скорость набегания на жалюзи проверяется по формуле и сравнивается с оптимальной:

$$w_{\text{ж(наб)}} = \frac{v_{\text{вх}} \cdot G_{\text{спл.вх}}}{F_{\text{ж(наб)}}},$$

где  $v_{\text{вх}}$  – удельный объем водо-воздушной смеси, м<sup>3</sup>/кг;  $G_{\text{спл.вх}}$  – расход смеси, кг/с.

Потери давления в канале определяются по следующей формуле:

$$\Delta P = \xi \frac{w_{\text{ж(наб)}}^2}{2v_{\text{вх}}},$$

где  $\xi$  – сумма местных сопротивлений.

Также в рамках выполнения настоящей работы, применялось численное моделирование с применением вычислительной газодинамики сепарационного модуля проводилось методом Volume of Fluid (VOF) Model. Математическая модель основана на моделировании двухфазного потока в сепараторе.

На модели сепарационных жалюзи исследовался диапазон влажности водо-воздушной смеси с 10 % до 3 %, в диапазоне скоростей набегания потока от 8 до 3 м/с.

#### Список литературы

1. РТМ 108.020.107-76 Тепловой и гидравлический расчет промежуточных сепараторов-пароперегревателей турбин насыщенного пара АЭС / НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова, Подольский машиностроительный завод им. Орджоникидзе / 1976 г., 134 стр.
2. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М. О. Штейнберга.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.; Машиностроение, 1992.— 672 с: ил.
3. Диссертация кандидата техн. наук Денисова Константина Николаевича “Расчетно-экспериментальное обоснование параметров и конструкции СПП для перспективных блоков АЭС с ВВЭР”. Тема диссертации и автореферата по ВАК РФ 05.14.03.
4. Zhang H, Liu Q 2020 Numerical investigation on performance of MS Experimental validation, applications and new findings, p.1-19.

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИМПАКТНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНЕГО ДВУХМОДОВОГО ВОЗМУЩЕНИЯ

Строева П.С.<sup>1,2</sup>, Ничик М.Ю.<sup>1</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>

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

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

В настоящее время актуальной задачей является развитие методов управления гидродинамикой струйных течений для интенсификации теплообмена. Как известно, внешнее периодическое возмущение, вносимое в поток, является эффективным способом управления интенсивностью турбулентного переноса на начальном участке струй за счёт воздействия на процесс формирования кольцевых вихрей. Таким образом, крупномасштабные вихревые структуры в струях влияют на интенсивность процесса теплообмена [1].

В последние годы широкое использование методов анализа поля скорости позволило значительно продвинуться в изучении когерентных вихревых структур. Например, эти методы позволяют выделять когерентные вихревые структуры с наибольшей кинетической энергией в потоке. Кроме этого, данные методы позволяют добиться понижения размерности динамических систем методами линейной алгебры для выявления закономерностей в динамике турбулентных течений. В частности, метод DMD (dynamic mode decomposition) [2] позволяет определить пространственно-временные характеристики присутствующих в потоке когерентных структур, а также получить низкоразмерную аппроксимацию их динамики на основе последовательности полей мгновенной скорости, полученных с помощью PIV измерений.

Суть алгоритма DMD заключается в представлении ансамбля из полей мгновенной скорости в виде ряда произведений пространственных базисных функций (DMD мод) и временных коэффициентов, имеющих вид экспоненциально возрастающих (или затухающих) гармонических осцилляций. Для восстановления низкоразмерной динамики потока используются первые две-три доминирующие моды DMD и поле средней скорости.

Одночастотное возмущение как один из методов активного контроля струйными потоками достаточно хорошо изучен. Систематическое исследование влияния двухчастотного возмущения на характеристики импактной струи и теплообмен вблизи импактной поверхности в литературе отсутствует. Таким образом, было проведено экспериментальное исследование динамики потока импактной струи в условиях внешнего двухчастотного возмущения методом PIV с последующим анализом динамики вихревых структур с помощью метода DMD.

В эксперименте число Рейнольдса составляло  $Re = 12500$ . Импактная струя формировалась круг-

лым соплом Витошинского с внутренним диаметром  $D = 20$  мм. Расстояние между кромкой сопла и импактной поверхностью составляло  $H = 2D$ . Пульсации расхода жидкости генерировались на основной частоте  $f = 12.4$  Гц, которая соответствовала числу Струхала  $St = 0.5$ . Частоты модуляции соответствовали  $1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/8$  от основной частоты. Для реализации метода PIV был использован измерительный комплекс, состоящий из двойного импульсного Nd:YAG лазера, высокоскоростной CMOS-камеры. Частота съемки составляла 3 кГц.

На рис. 1 представлены пример мгновенного поля скорости и пример реконструкции поля по DMD модам. Также, вихревые структуры выделены контурами положительных значений Q-критерия. Для каждого режима по визуализации полученных реконструкций в течение полного периода наблюдается влияние модуляции основной частоты внешних возмущений на слияние вихрей вблизи стенки.

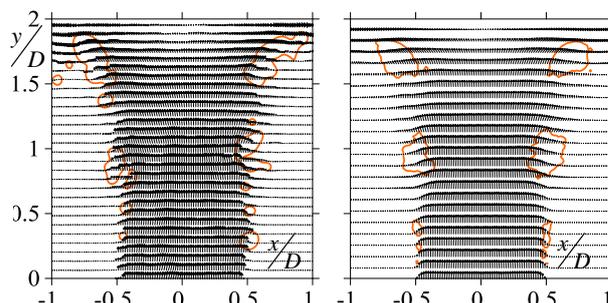


Рис. 1. Примеры мгновенных полей скорости для режима  $f_m = f/2$  (слева – оригинал, справа – реконструкция)

Таким образом, амплитудная модуляция может быть эффективно использована для управления образованием вихревых пар в пристеночной области. Управляя движением вихрей, создавая их с необходимой периодичностью, которая приводила бы к слиянию, можно управлять и теплообменом вблизи стенки.

### Список литературы

1. Drobniak S., Elsner J. W., El-Kassem E. S. A. The relationship between coherent structures and heat transfer processes in the initial region of a round jet //Experiments in fluids. – 1998. – Т. 24. – №. 3. – С. 225-237.
2. Schmid P. J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data //Journal of fluid mechanics. – 2010. – Т. 656. – С. 5-28.

## ТЕПЛОБМЕН И ТРЕНИЕ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ОБТЕКАНИИ ОБРАТНОЙ СТУПЕНЬКИ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

Хазов Д.Е., Виноградов Ю.А.

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

Сверхзвуковые течения встречаются во многих технических приложениях. Например, при безмашинном энергоразделении газового потока [1, 2]. Как известно, сверхзвуковой поток очень чувствителен к внешним воздействиям. Так, например, обтекание сверхзвуковым потоком ступеньки, как прямой, так и обратной сопровождается отрывом потока и образованием скачков уплотнения. Подобные течения довольно хорошо изучены с газодинамической точки зрения [3]. Однако с точки зрения процессов теплообмена остаётся ещё много открытых вопросов. Так, например, в работе [4] приводятся данные о интенсификации теплообмена при взаимодействия ударной волны с пограничным слоем: отрыв пограничного слоя от стенки и его последующее присоединение увеличивает интенсивность теплоотдачи на стенке пропорционально градиенту статического давления. Этот факт подтверждается многочисленными исследованиями других авторов. Однако влиянию тех же самых условий на коэффициент восстановления температуры посвящено гораздо меньше исследований [5, 6].

В данной работе проводится численное моделирование сверхзвукового турбулентного обтекания обратной ступеньки. На базе двумерных уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу построены математические модели, описывающие сверхзвуковые течения около обратной ступеньки. На основе доступных экспериментальных данных [5–8] проводится валидация разработанных численных моделей (см. рис. 1). Приводятся сравнение полей давления и температуры. Анализируется влияние модели переменного турбулентного числа Прандтля на результаты моделирования. Проводятся параметрические исследования по влиянию высоты ступеньки на изменение коэффициента восстановления температуры (см. рис. 2) и коэффициента теплоотдачи. В качестве рабочего тела рассматривается воздух, а также газовые смеси с низким значением молекулярного числа Прандтля.

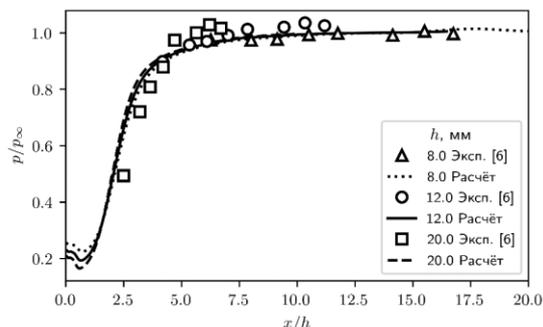


Рис. 1. Распределение давления за ступенькой при различных высотах ступеньки  $h$ .  $M_0=2.2$ . Символы — эксперимент [6], линии — расчёт.

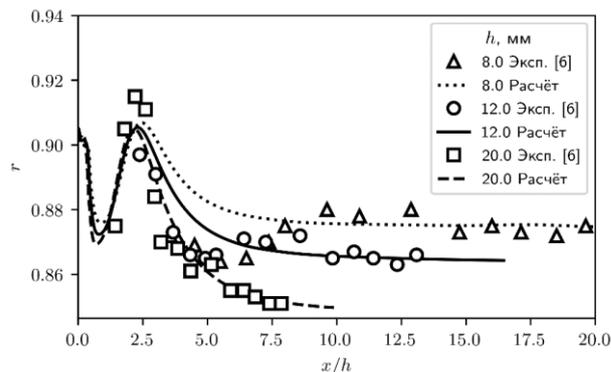


Рис. 2. Распределение коэффициента восстановления температуры за ступенькой при различных высотах ступеньки  $h$ .  $M_0=2.2$ . Символы — эксперимент [6], линии — расчёт.

Полученные данные могут быть полезны как при расчёте процессов теплообмена при сверхзвуковых скоростях и наличии градиента статического давления, так и при проектировании устройств безмашинного энергоразделения, использующих эффект газодинамического энергоразделения в пограничном слое.

### Список литературы

1. A. I. Leontiev, A. G. Zditovets, Yu. A. Vinogradov, M. M. Strongin, and N. A. Kiselev. Experimental investigation of the machine-free method of temperature separation of air flows based on the energy separation effect in a compressible boundary layer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, (88):202–219, 2017.
2. D. E. Khazov, A. I. Leontiev, A. G. Zditovets, N. A. Kiselev, and Yu. A. Vinogradov. Energy separation in a channel with permeable wall. *Energy*, 239:122427, 2022.
3. Dolling D.S. Fifty Years of Shock-Wave/Boundary-Layer Interaction Research: What Next? // *AIAA Journal*. 2001. № 8 (39). С. 1517–1531.
4. Ligrani P.M., Oliveira M.M., Blaskovich T. Comparison of Heat Transfer Augmentation Techniques // *AIAA Journal*. 2003. № 3 (41). С. 337–362.
5. Gadd G.E., Cope W.F., Attridge J.L., Heat-transfer and skin-friction measurements at a Mach number of 2.44 for a turbulent boundary layer on a flat surface and in regions of separated flow // R. & M. No. 3148. A.R.C. Technical Report. London. 1960. 42 p.
6. С. С. Попович. Аэродинамическое охлаждение стенки при тчении сверхзвукового потока в следе за обратным уступом. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2019. № 20 (1). С. 1–11.
7. McDaniel, J. C., Fletcher, D. G., Hartfield, R. J., Jr., and Hollo, S. D., Staged Transverse Injection into Mach 2 Flow Behind a Rearward-Facing Step: A 3-D Compressible Test Case for Hypersonic Combustor Code Validation, Third International Aerospace Plane Conference, AIAA Paper 91-5071, Orlando, FL, Dec. 1993
8. Hartfield R. J. Jr., Hollo S. D., McDaniel J. C., Planar measurement technique for compressible flows using laser-induced iodine fluorescence, *AIAA Journal* 1993 31:3, 483–490

Черевко А.А.<sup>1,2</sup>, Бугай Ю.В.<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет (НГУ),  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

Проведён анализ клинических данных о кровотоке в окрестности сосудистых патологий головного мозга. На основе сочетания методов теории обратных задач для дифференциальных уравнений и статистических методов отобраны адекватные статистические модели и выявлены параметры, которые характеризуют отличие кровотока в окрестности аневризм и артериовенозных мальформаций.

Работа проводилась на основе данных о скорости и давлении в окрестности патологий, полученных во время нейрохирургических операций [1]. Были использованы данные 8 пациентов с артериальными аневризмами и 9 пациентов с артериовенозными мальформациями. Для каждого пациента в течении операции проводилось несколько измерений, всего в совокупности для всех пациентов использовалось 170 измерений. Каждое измерение представляет собой величины давления и скорости крови в артериальном русле вблизи патологии собранные с частотой дискретизации 200 Гц на промежутке времени 5 секунд. Зависимости скорости и давления от времени имеют сложный характер, поэтому было предложено [2] описывать связь между скоростью и давлением в виде нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения, коэффициенты которого в совокупности характеризуют особенности кровотока и определяются по клиническим данным методами теории обратных задач. Статистическими методами было вы-

явлено различное (на уровне статистической значимости 5%) для различных типов патологий поведение суммы членов уравнения, не содержащих производных (эта сумма представляет собой многочлен четвёртой степени от нормированного давления). Остальные параметры или сильно скоррелированы с этой величиной или статистически не значимы. Эта сумма членов уравнения имеет физиологическую интерпретацию - она соответствует упругим свойствам кровеносного русла.

Полученные результаты могут быть потенциально использованы при интраоперационном гемодинамическом мониторинге, предоставляя дополнительную важную информацию о параметрах кровотока, а также для моделирования течения крови вблизи сосудистых патологий.

#### Список литературы

1. А. К. Хе, А.А. Черевко, А. П. Чупахин, А. Л. Кривошапкин, К. Ю. Орлов, В. А. Панарин Мониторинг гемодинамики сосудов головного мозга // ПМТФ, 2017, Т. 58, № 5. С. 7–16
2. E.E. Bord, A.A. Cherevko, A.K. Khe, V.A. Panarin, K.Ju. Orlov The analysis of solutions behaviour of Van der Pol Duffing equation describing local brain hemodynamics // Journal of Physics: Conf. Series 894 (2017) 012012

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-11-00264).*

Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В., Тинтулова М.В.

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

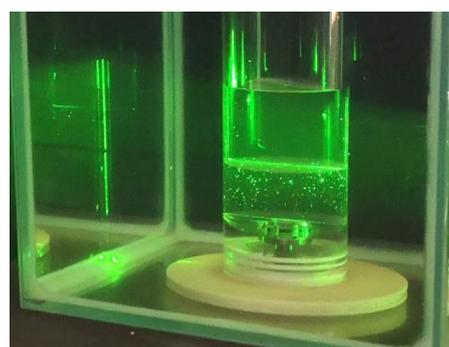
Исследование формирования вихревых структур для улучшения тепло-массообменных процессов в биологических и энергетических технологиях является важнейшим приложением в разработке вихревых аппаратов и оптимизации рабочих режимов [1]. Во многих вихревых аппаратах существует взаимодействие вращающейся рабочей жидкости с другой жидкостью или газом [2-4]. Исследование взаимодействия двух несмешиваемых вращающихся сред имеет большой практический и фундаментальный интерес для оптимизации конструкций и методов управления вихревыми реакторами. В работе [5] было обнаружено, что сходящееся над границей раздела спиральное течение менее плотной верхней жидкости формирует под границей раздела расходящееся спиральное движение нижней жидкости.

В данной работе выполнено экспериментальное исследование влияния граничных условий на структуру вихревого течения жидкости в цилиндрическом контейнере с вращающимся диском. Были измерены распределения скорости при организации вихревого движения жидкости со свободной верхней границе раздела (I), твёрдой границе (II), в системе двух (III) и трёх несмешиваемых жидкостей (IV).

Исследования проводились в вертикальном цилиндрическом контейнере (радиус  $R = 45$  мм) с нижним диском, вращающимся с угловой скоростью  $\omega$  (см. рис. 1) методом PIV в горизонтальном сечении вблизи границы раздела. В качестве рабочей жидкости использовался 65% раствор глицерин-вода (I, II) (плотность  $\rho_g = 1150$  кг/м<sup>3</sup>, кинематическая вязкость  $\nu_g = 15$  мм<sup>2</sup>/с). В качестве второй жидкости (III) использовалось подсолнечное масло ( $\rho_o = 916$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu_o = 41.9$  мм<sup>2</sup>/с). Система трёх несмешиваемых жидкостей (IV) состояла из 85% раствора глицерина с водой ( $\rho_g = 1208$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu_g = 81.5$  мм<sup>2</sup>/с), подсолнечного масла и спирт-глицеринового раствора ( $\rho_{sg} = 900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu_{sg} = 7.37$  мм<sup>2</sup>/с). Высота слоя исследуемой жидкости  $h_g$  менялась от  $0.2R$  до  $1R$  с шагом  $0.2R$ , а высота других жидкостей была фиксирована  $h_o = 1R$ . Число Рейнольдса  $Re = \omega R^2 / \nu_g$  варьировалось от 200 до 1000. Исследования проводились

Были определены зависимости формирования циркуляционного движения при увеличении закрутки потока и изменении высоты рабочей жидкости. Показано, что в случае с твёрдой границей при малой высоте рабочей жидкости наблюдается меридиональная циркуляция во всём объёме. В то же время в случае свободной границы раздела вблизи оси наблюдается зона с нулевой радиальной компонентой скорости, то есть меридиональная циркуляция формируется не во всём объёме цилиндра, а только вблизи стенок. При увеличении высоты столба жидкости область, в которой отсутствует радиальная составляющая, уменьшается. Получено, что для циркуляции жидкости во всём объёме необходимо, чтобы высота слоя жидко-

сти была не менее  $1R$ . Но при наличии сверху второй жидкости, даже при  $h_g = 0.2R$ , в рабочей жидкости формируется меридиональное течение как в конфигурации с твёрдой границей.



(a)

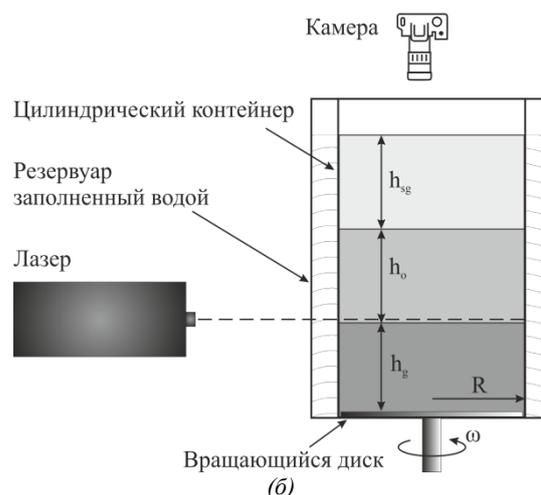


Рис. 1. Фотография (a) и схема установки (б).

## Список литературы

1. Shtern V. Cellular Flows. Topological Metamorphoses in Fluid Mechanics // New York: Cambridge University Press. 2018. 584 p.
2. Savelyeva A. V. et al. Analysis of the efficiency of recombinant Escherichia coli strain cultivation in a gas-vortex bioreactor // Biotechnology and Applied Biochemistry, 2017, Vol. 64(5), P. 712-718.
3. Skripkin S.G., Tsoy M.A., Naumov I.V. Visualization the different type of vortex breakdown in conical pipe flow with high cone angle // Journal of Flow Visualization and Image Processing, 2021, Vol. 28(2), P. 43-53.
4. Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В. Передача углового момента через границу раздела двух несмешиваемых жидкостей // Теплофизика и аэромеханика, 2021, Т. 28, № 1, С. 67-78
5. Наумов И. В., Штерн В. Н. Двухэтажное торнадо // Природа, 2021, № 4, С. 8-15.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00083-П).

Ссылка на информацию о проекте:  
<https://rscf.ru/project/22-19-35009>.

## ЭВОЛЮЦИЯ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЙ ГЕНЕРИРУЕМЫХ ИНЕРЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ С НЕОСЕСИММЕТРИЧНЫМИ ТОРЦАМИ

Ширяева М.А., Субботин С.В.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет,  
ул. Сибирская 24, Пермь, 614990, Россия

Экспериментально исследуется динамика инерционных волн в неравномерно вращающемся (либрирующем) цилиндре, торцы которого симметрично наклонены относительно плоскости поперечного сечения. Источниками волн являются области соединения боковой и торцевых стенок полости. Направление групповой скорости волн относительно оси вращения определяется [1]:

$$\Theta = \pm \arcsin\left(\frac{\sigma}{2}\right),$$

где  $\sigma$  - безразмерная частота либраций.

Благодаря наклону торцов геометрия полости поддерживает два резонансных режима: волновой аттрактор  $(n, m)$  и симметричное отражение волн  $(n, m)$ , где  $n$  и  $m$  - осевое и радиальное целые волновые числа. Аттрактор в осевом сечении представляет собой параллелограмм, соотношение длин сторон которой определяется частотой либраций (рис.1, а). При симметричном отражении волны также образуют замкнутую траекторию (рис.1, б).

В системе отсчёта полости за один период либраций скорость пульсационного течения дважды достигает максимального и минимального значения в фазах крайнего положения полости. Исследованы законы масштабирования волн с числом Экмана. Ширина волнового пучка изменяется как  $\sim E^{1/5}$ , при этом групповая скорость волны пропорциональна  $\epsilon E^{-2/5}$ . Полученные данные согласуются с численными расчётами, выполненными для сферического слоя [2]. В течение периода либраций происходит изменение направления жидкости вдоль замкнутой траектории (рис.1, в).

С повышением амплитуды либраций течение становится неустойчивым, что проявляется в азимутальном перемешивании жидкости. Для исследования механизма неустойчивости проводится спектральный анализ азимутального мгновенного поля скорости. Анализ результатов показал, что появление вторичных волн связано с триадный субгармонический резонансом [3]. В спектрах, полученных для частотного диапазона аттрактора, наблюдаются две субгармоники, сумма частот которых соответствует частоте либраций. В случае режима симметричного отражения волн количество субгармоник в спектре, удовлетворяющих условию триадного резонанса, удваивается.

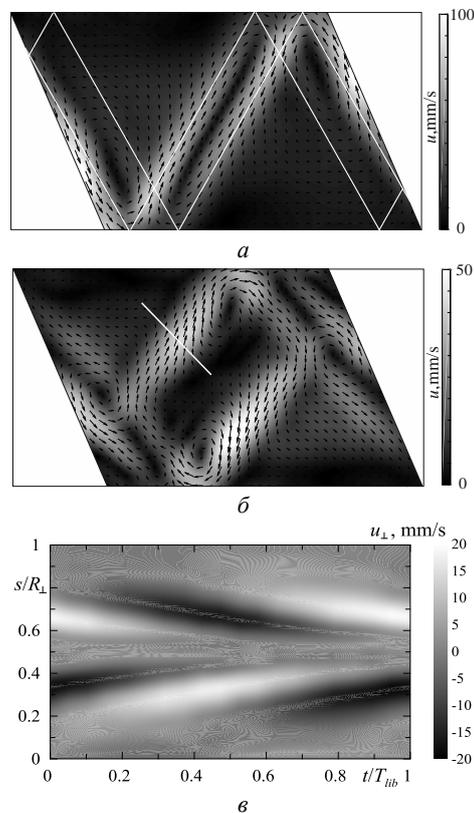


Рис. 1. Мгновенные поля скорости для режимов аттрактора  $(3,1)$  при  $\sigma = 1.62$  (а) и симметричного отражения волны  $(1,1)$  при  $\sigma = 1.44$  (б) в фазе. На фрагменте (в) представлена временная динамика скорости поперек направления  $S$  (белая линия, (б)).

### Список литературы

1. Greenspan H.P. The Theory of Rotating Fluids // University Press, Cambridge. 1968. P. 302.
2. Lin Y., Noir J. Libration-driven inertial waves and mean zonal flows in spherical shells // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 2021. V. 115. N. 3. P. 258-279.
3. Brouzet, C., Ermanyuk, E.V., Joubaud, S., Pillet, G., Dauxois, T.: Internal wave attractors: different scenarios of instability // J. Fluid Mech. 2017. V. 811. P.544–568.

Работа поддержана гос. задание Минпросвещения РФ (проект КРЗУ-2023-0002).

Шмакова Н.Д.<sup>1</sup>, Рудая Я.Е.<sup>1,2</sup>, Ерманиук Е.В.<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

Исследования динамики внутренних волн и волновых аттракторов является актуальной проблемой океанологии и геофизической гидродинамики, поскольку перемешивание слоёв жидкости, связанное с обрушением внутренних волн, оказывает влияние на баланс энергии в океане [1] и, в конечном счёте, на климат на планете.

Внутренние волны возникают в океане, стратифицированном по плотности и температуре, при взаимодействии приливных течений с рельефом океанического дна [2]. В лабораторных экспериментах часто рассматривается система отсчёта, связанная с приливным течением, т.е. жидкость находится в покое, а колебания осуществляет погруженное в жидкость тело [3]. Дисперсионное соотношение для таких волн имеет вид  $\omega/N = \sin \theta$ , где  $\omega$  - частота колебания,  $N$  - частота плавучести,  $\theta$  - угол распространения волны с горизонталью.

Из дисперсионного соотношения следует специфический закон отражения волновых лучей от наклонной стенки: падающая и отражённая волны распространяются под одним и тем же углом к вектору силы тяжести, что приводит к фокусировке волновой энергии. При определенном сочетании геометрии области и угла распространения волновых лучей фокусировка может привести к концентрации энергии волн вблизи замкнутых геометрических конфигураций, называемых волновыми аттракторами [4].

В данной работе проведено экспериментальное исследование квазидвумерных аттракторов (1,1) внутренних волн, имеющих по одному отражению от вертикальной и горизонтальной стенки трапециевидной геометрии (см. рис. 1). Целью работы было вычисление мощности подводимой к системе. В работе [5], была предложена методика вычисления подводимой мощности через поле давления, полученное из численных расчётов или поля скоростей из экспериментальных данных.

В данной работе в качестве волнового генератора была использована вертикальная пластина, совершающая угловые колебания. На пластину были установлены датчики момента силы и линейных перемещений, а мощность рассчитывалась напрямую из данных с датчиков. Полученные результаты сравниваются с вычислениями нагнетаемой мощности из двумерных расчетов прямым численным моделированием [6] и экспериментальных полей скоростей, полученных методом PIV по методике [5]. Показано, хорошее соответствие между тремя методами в линейном режиме при малых амплитудах колебания пластины (см. рис. 2). При больших амплитудах колебаний разница между мощностями из численных расчётов и из экспериментальных данных составляет около 60%, что объясняется двумерностью числен-

ных расчётов, не учитывающих диссипацию на стенках. Различия между мощностями с датчика и из экспериментальных данных объясняется тем, что датчики улавливают силу, действующую на всю пластину, в то время как поля скоростей получены только в одной горизонтальной плоскости. Полученные данные имеют важное значение для дальнейших исследований волновой энергии.

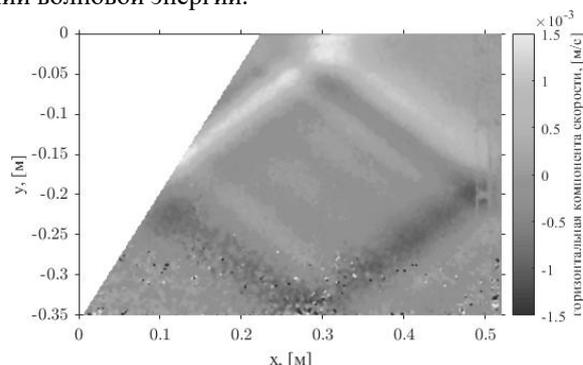


Рис. 1. Аттрактор внутренних волн в линейном режиме

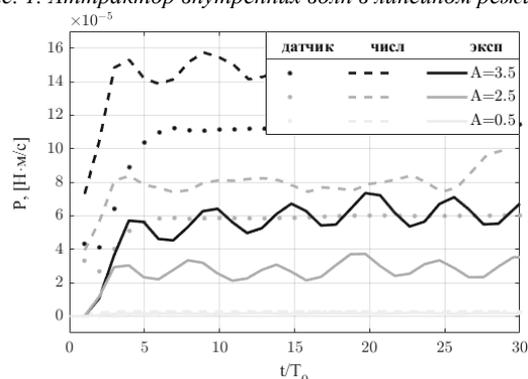


Рис. 2. Мощность, нагнетаемая в систему, для различных амплитуд колебания пластины - волнопродуктора

## Список литературы

- Huang R.X. Ocean, Energy Flows // in. Encyclopedia of Energy. 2004. V. 4. P. 497-509.
- Garrett C., Kunze E. Internal tide generation in deep ocean // Annu. Rev. Fluid Mech. 2007. V. 39. P. 57-87.
- Mowbray D. E., Rarity B. S. H. A theoretical and experimental investigation of the phase configuration of internal waves of small amplitude in a density stratified liquid // J. Fluid Mech. 1967. V. 28, P. 1-16.
- Maas L. R. M., Benielli D., Sommeria J., Lam F. P. A. Observation of an internal wave attractor in a confined, stably stratified fluid. 1997. Nature. V. 388. P. 557-561.
- Davis G., Dauxois T., Jamin T., Joubaud S. Energy budget in internal wave attractor experiments // J. Fluid Mech. 2019. V. 880. PP. 743-763
- Сибгатуллин И.Н., Ерманиук Е.В. Аттракторы внутренних волн (обзор) // ПМТФ. 2019. № 2. С. 113-136

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-41-00090).





## СЕКЦИЯ 2

# Гидродинамика и теплообмен в многофазных системах





## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ СЛОЯ ЖИДКОСТИ, УВЛЕКАЕМОГО ТУРБУЛЕНТНЫМ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Апостол Ю.С.<sup>1,2</sup>, Вожаков И.С.<sup>1,2</sup>

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

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

Двухфазные газожидкостные потоки имеют множество приложений в различных сферах, что провоцирует высокий интерес к их изучению. Например, плёночные течения часто встречаются в теплообменном оборудовании, так как являются эффективными при отводе тепла из-за малой толщины; наличие же диспергированной фазы - капле - может увеличивать площадь межфазной поверхности на порядки, что увеличивает скорость химических реакций.

Стратифицированные режимы течения включают в себя как течения с гладкой поверхностью жидкости, так и с волнистой, а при дальнейшем увеличении скорости газового потока происходит отрыв и унос капле. Обычно волны на границе раздела фаз при больших скоростях газового потока подразделяются на волны возмущения, волны быстрой и медленной ряби, иногда также включают большие волны [1].

Предметом исследования в данной работе являются волны, продуцируемые движением турбулентного газового потока, на поверхности слоя жидкости. Целью работы является получение характеристик волн при высоких расходах жидкости и газа, а также механизмов их образования. Исследуемым вопросом также является влияние турбулентных пульсаций на форму межфазной поверхности.

Исследование проводилось при помощи моделирования, которое осуществлялось путем численного решения уравнений Навье-Стокса с использованием платформы с открытым исходным кодом OpenFOAM, основанной на методе конечных объёмов. Расчёты проведены методом крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation) для различных скоростей газового потока. Расчётная область представляла собой прямоугольный канал поперечного сечения 2,6 см на 1 см длиной 5 см, число Рейнольдса газовой фазы составляло 20000, жидкости – 500.

Получены пространственно-временные диаграммы, описывающие поведение волн для различных

значений скорости газового потока. Обнаружено, что турбулентные пульсации вызывают искривление межфазной поверхности, также замечено, что генерация волн быстрой ряби происходит в результате воздействия турбулентных пульсаций газового потока на слой жидкости.

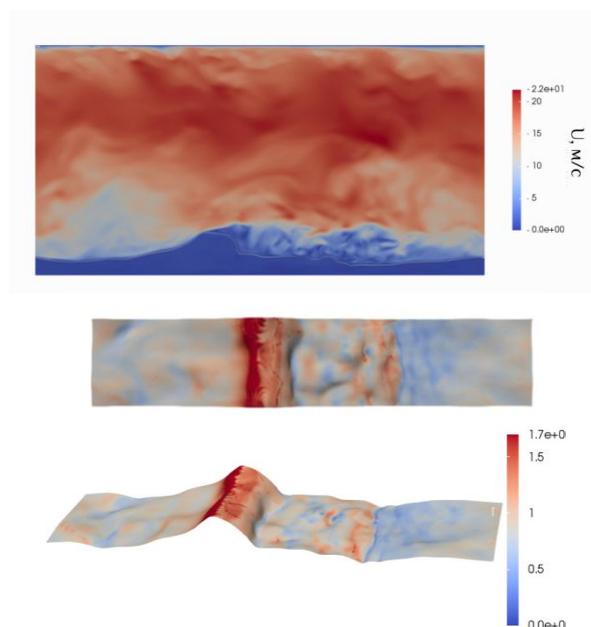


Рис. 1 Поле скорости и межфазная поверхность при скорости газового потока 14 м/с

### Список литературы

1. Azzopardi B. J. Drops in annular two-phase flow //International Journal of Multiphase Flow. – 1997. – Т. 23. – №. 7. – С. 1-53.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАССЛОЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ЭМУЛЬСИИ В ПОТОКЕ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Валиуллина В.И.<sup>1</sup>, Аюпов А.Р.<sup>1</sup>, Галеев Р.Р.<sup>1</sup>, Мусин А.А.<sup>1</sup>, Ковалева Л.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологий,  
Заки Валиди 32, Уфа, 450076, Россия

Параметры инженерного проектирования тесно связаны с типом режима двухфазного потока, поэтому правильное прогнозирование структуры потока при условиях прохождения по каналам различной геометрии является одной из наиболее важных частей анализа двухфазного потока. Немаловажным является подбор режимов перекачки, при котором эмульсия не только не перемешивается, но и не расслаивается. Исследования в области взаимодействия электромагнитного (ЭМ) поля с дисперсными системами показали, что кроме теплового воздействия, в эмульсии появляются разрушающие силы, требующие изучения [1].

Было проведено экспериментальное исследование влияния вынужденной конвекции, которая обусловлена перепадом давления, на динамику расслоения эмульсий в комбинации с ЭМ воздействием. Для этих целей была собрана экспериментальная установка, предназначенная для наблюдения различных режимов течения в горизонтальном канале. Была спроектирована и изготовлена прямоугольная экспериментальная ячейка, с одним отверстием для притока жидкости (1 на рис. 1) и двумя – для оттока (2 и 3 на рис. 1). Ячейка была разработана для оптического наблюдения, поэтому боковые стороны были выполнены из проводящих ИТО стекол. Эксперименты фиксировались на фотокамеру.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Эксперименты были выполнены с использованием модельных эмульсий типа «вода в масле», с массовой концентрацией  $C=5\%$ , методика создания которой приведена в работе [2]. Испытания включали в себя серию экспериментов с различными значениями расходов жидкости  $q=5\div 30$  мл/мин с шагом 5 мл/мин при низкочастотном ЭМ воздействии и без воздействия. Частота ЭМ поля составила 500 кГц при напряжении 300 В. Результаты экспериментов были обработаны с помощью метода Particle Image Velocimetry (PIV) (см. рис. 2). Был проведен анализ образцов эмульсии, взятых из нижнего и верхнего отверстий ячейки, под инвертированным микроскопом Olympus IX71 для определения размеров капель воды в эмульсии. Кроме того, после экспериментов отобранная эмульсия отстаивалась для того, чтобы определить объемное содержание воды.

В ходе экспериментов было замечено, что характеристика средней скорости жидкости возрастала пропорционально увеличению расхода жидкости,

при этом относительное движение фаз заметно увеличивалось в случае электромагнитного воздействия, что связано с действием электрофоретических сил и процессами коалесценции капель, которые наблюдались в ходе эксперимента.

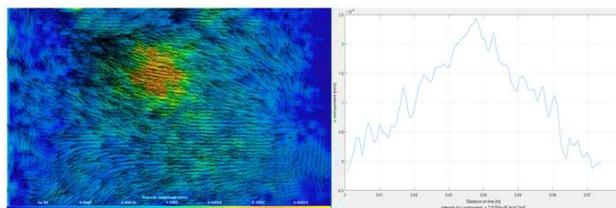


Рис. 2. Структура потока и значения величины скорости

Была отмечена тенденция к увеличению размера капель воды при выходе эмульсии из нижнего отверстия, что связано с электрокоалесценцией капель. Скорость осаждения укрупнённых капель становится выше скорости течения, следовательно, капли оседают на дно ячейки.

Были получены зависимости количества отслоившейся воды от расхода жидкости. Обнаружено, что с ростом расхода жидкости при отборе из нижнего отверстия ячейки, объём отслоившейся воды значительно снижается, в то время как количество отслоившейся воды в образце из верхнего отверстия растёт (см. рис. 3).

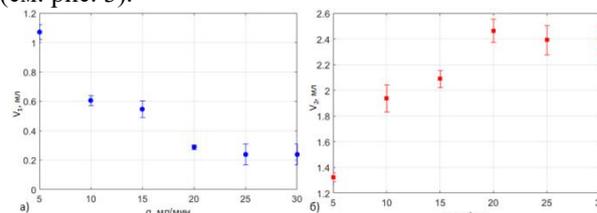


Рис. 3. Зависимость количества отслоившейся воды при отборе из нижнего (а) и верхнего (б) отверстий ячейки

Это связано с перераспределением капель воды в ячейке под действием гравитационных сил при изменении скорости подачи жидкости.

Таким образом, в работе было исследовано влияние соотношения расходов жидкости в комбинации с ЭМ воздействием на результирующую динамику расслоения эмульсий в отобранных пробах с целью повышения эффективности разделения дисперсных систем в потоке.

### Список литературы

1. Kovaleva L. A. et al. Laboratory investigations of the heating of high-viscosity oil in pipelines by a high frequency electromagnetic field (Russian) // Oil Ind. J. 2019. V. 2019. N 02. P. 82-85.
2. Valliullina V. I. et al. Experimental and numerical study of gravitational sedimentation of the polydisperse water-in-oil emulsion // J. of Phys. 2020. V. 1675. N. 1. P. 012025.

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

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕМОЛИКВОРОДИНАМИКИ ГОЛОВНОГО МОЗГА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МАГНИТНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ****Валова Г.С.<sup>1</sup>, Черевко А.А.<sup>1</sup>, Богомякова О.Б.<sup>2</sup>, Тулупов А.А.<sup>2</sup>, Акулов А.Е.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,

пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Международный томографический центр СО РАН,

ул. Институтская 3а, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup> Институт цитологии и генетики СО РАН,

пр. Лаврентьева 10, Новосибирск, 630090, Россия

Существует большое количество заболеваний центральной нервной системы, характеризующихся нарушением движения внутримозговых жидкостей. Одной из таких патологий является гидроцефалия – патологическое состояние, при котором желудочки головного мозга увеличиваются, что приводит к смещению и сдавливанию мозговой ткани. Это состояние хорошо описано с точки зрения клинических проявлений, но его причины и развитие плохо изучены.

В работе изучается влияние взаимодействия жидких сред головного мозга на смещение стенки желудочков и давление на ней с помощью стационарной математической модели многожидкостной пороупругой фильтрации для вещества головного мозга [1, 2]. Математическое моделирование было выполнено на основании МРТ данных добровольцев (МТЦ СО РАН) и МРТ данных лабораторных мышей (ИЦиГ СО РАН) в двумерном приближении.

Взаимодействие жидких сред в данной математической модели описывается набором из четырех числовых коэффициентов взаимодействия. На основе результатов численных расчётов качественно описан характер влияния коэффициентов взаимодействия на

среднее смещение стенки желудочков и давление на ней. Также для количественного изучения влияния на среднее смещение стенки желудочков значений параметров взаимодействия для данных добровольцев и мышей была построена множественная линейная регрессия.

В результате регрессионного анализа было обнаружено преобладающее влияние капиллярно-ликворного звена. А также найдены наборы коэффициентов взаимодействия, которые соответствуют клинической картине неврологических патологий.

**Список литературы**

1. Tully B., Ventikos Y. Cerebral water transport using multiple-network poroelastic theory: application to normal pressure hydrocephalus // J. Fluid Mech. 2011. V.6677, P. 188–215.
2. Valova G., Bogomyakova O., Tulupov A., Cherevko A. Influence of interaction of cerebral fluids on ventricular deformation: A mathematical approach // Plos one. 2022. V.17, N.2. e0264395.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-11-00264).*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ПУЗЫРЕЙ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ

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

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

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

Изучение газожидкостных течений и динамики газовых пузырей имеет большое значение в различных инженерных и промышленных областях, таких как нефтегазовая, химическая и микробиологическая промышленность. Размер отдельных пузырей оказывает значительное влияние на скорость движения дисперсной фазы в потоке жидкости, на расстояния между пузырями и на возможность формирования устойчивых кластерных пузырьковых структур.

Основная часть экспериментальных работ посвящена движению пузырьков в вертикальных трубах [1, 2]. Значительно меньше внимания уделяется движению пузырей в наклонных каналах [3, 4], несмотря на то, что угол наклона может оказывать значительное влияние на размер и скорость газовых пузырей, а также на распределение газовой фазы по сечению канала.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию диаметра и скорости газовых пузырей, введенных в поток жидкости в наклонной трубе через одиночный капилляр. Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой замкнутый по жидкости двухфазный циркуляционный контур. Жидкость из основного бака (1) с помощью центробежного насоса (2) через ротаметр (3) подается в рабочий участок, на входе в который установлены сетки (4) для выравнивания потока жидкости. Газ (воздух) от компрессора через измеритель-регулятор расхода (5) подается в жидкость через одиночный капилляр с внутренним диаметром  $D_c = 0,2$  мм (6). Рабочим участком (7) служит оптически прозрачная труба с внутренним диаметром  $D_t = 21$  мм.

Измерения проводились при углах наклона трубы  $30 \div 60^\circ$ . В выбранном диапазоне углов наклона в работах по исследованию теплообмена в газожидкостных пузырьковых потоках в плоском наклонном канале показано значительное увеличение теплообмена и трения на стенке [5]. Съёмка пузырей велась при освещении LED-матрицей (8) на системную камеру Nikon Zfc (9). После измерительной секции газожидкостная смесь попадала в бак-сепаратор (10), откуда возвращалась в основной бак (1).

Получены новые экспериментальные данные о скорости движения одиночных пузырей в зависимости от размера пузыря и от угла наклона рабочего участка. Получены распределения диаметров газовых пузырей для различных углов наклона канала и различных значений расхода газа и жидкости, показано влияние угла наклона на отрывной диаметр пузыря.

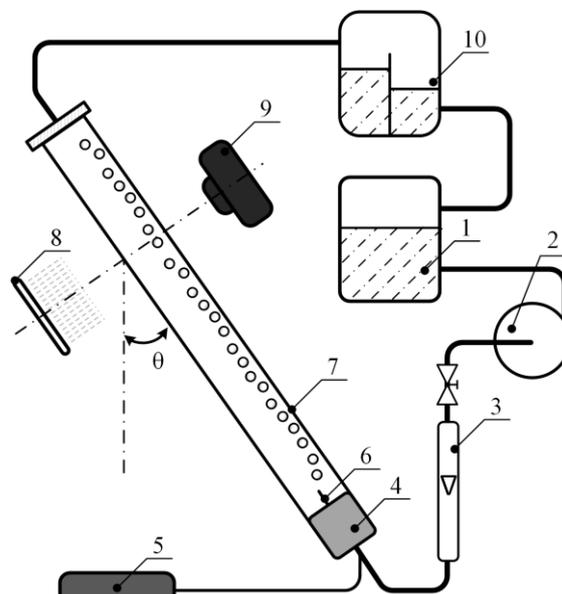


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.  
1 – основной бак, 2 – центробежный насос, 3 – ротаметр, 4 – сетки, 5 – измеритель-регулятор расхода газа, 6 – капилляр, 7 – рабочий участок, 8 – LED-матрица, 9 – камера, 10 – бак-сепаратор

### Список литературы

1. Abdulkadir M., Ugwoke B., Abdulkareem L.A., Zhao D., Hernandez-Perez, V. Experimental investigation of the characteristics of the transition from spherical cap bubble to slug flow in a vertical pipe // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2021. (124). Pp. 110349.
2. Wang G., Zhang M., Dang Z., Ishii M. Axial interfacial area transport and flow structure development in vertical upward bubbly and slug flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. (169). Pp. 120919.
3. Mei Y., Gong S., Gu H., Ma W. A study on steam-water two phase flow distribution in a rectangular channel with different channel orientations // *Exp Therm Fluid Sci*. 2018. Vol. 99. P. 219–232.
4. Zenit R., Tsang Y.H., Koch D.L., Sangani A.S. Shear flow of a suspension of bubbles rising in an inclined channel // *J. Fluid Mech*. 2004. Vol. 515. P. 261–292.
5. Гореликова А.Е., Кашинский О.Н., Пахомов М.А., Рандин В.В., Терехов В.И., Чинак А.В. Турбулентная структура течения и теплоперенос в наклонном пузырьковом потоке. Экспериментальное и численное исследование. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 2017, № 1. с. 117–129. DOI: 10.7868/S0568528117010066

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

## ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОГО РАСХОДНОГО ГАЗОСОДЕРЖАНИЯ НА СРЕДНИЙ РАЗМЕР ПУЗЫРЕЙ И РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ПУЗЫРЯМИ В ГАЗОЖИДКОСТНОМ ТЕЧЕНИИ В НАКЛОННОМ ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

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

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

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

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

Пузырьковые турбулентные потоки широко распространены в теплоэнергетике, химической и микробиологической промышленности. Корректное описание поведения потоков, в том числе характер распределения газовой фазы по сечению канала, диаметров пузырей и скорости их движения имеет большое значение для увеличения надежности оборудования и предотвращения внештатных ситуаций.

Несмотря на то, что ориентация канала может оказывать значительное влияние на гидродинамику двухфазных потоков, основная часть экспериментальных работ посвящена движению пузырьков в вертикальных трубах [1, 2]. Значительно меньше внимания уделяется движению пузырей в наклонных каналах [3, 4], несмотря на то, что угол наклона может оказывать значительное влияние на размер и скорость газовых пузырей, а также на распределение газовой фазы по сечению канала.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию размера и расстояния между ближайшими пузырями в газожидкостном потоке в плоском наклонном канале. Экспериментальная установка представляет собой замкнутый по жидкости двухфазный циркуляционный контур. Рабочим участком служит оптически прозрачный канал из оргстекла с поперечным сечением 10x100 мм. В качестве рабочей жидкости использовался электролит, аналогичный используемому в работе [5]. Газ (воздух) вводился в поток жидкости через генератор пузырей, состоящий из 41 капилляра с внутренним диаметром 0,36 мм. Концы капилляров погружались в рабочую жидкость на уровень 5 мм и располагались перпендикулярно направлению течения.

Эксперименты проводились при расходе жидкости  $0,316 \pm 0,829$  л/с и расходе газа  $0,003 \pm 0,083$  л/с. При всех комбинациях режимных параметров и углах наклона канала течение оставалось пузырьковым. Характерные изображения газовых пузырей для различных значений объемного расходного газосодержания  $\beta$  представлены на рис. 1.

Получены новые экспериментальные данные о зависимости размера пузырей и расстояниях между ближайшими пузырями от значения объемного расходного газосодержания. Показано, что при увеличении расхода газа размер и количество крупных пузырей в потоке увеличивается за счёт коалесценции пу-

зырей вблизи капилляров и по пути следования вдоль наклонной плоскости.

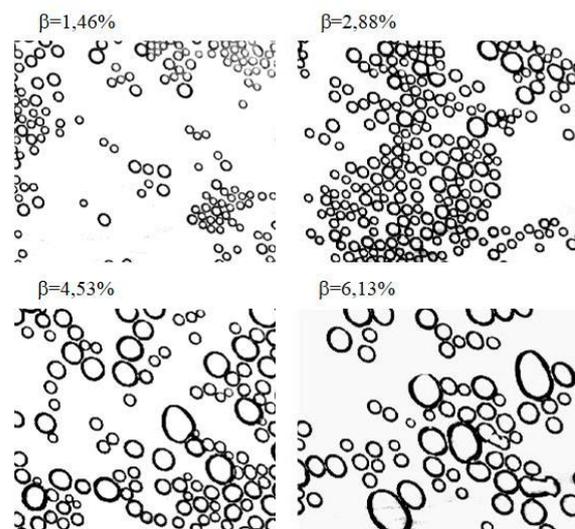


Рис. 1. Снимки пузырей при различных значениях объемного расходного газосодержания  $\beta$  (угол наклона плоского канала  $\theta = 45^\circ$ , расстояние от места ввода газа до точки съемки пузырей  $L = 470$  мм)

### Список литературы

1. Yuan P., Deng J., Pan L., Jiang G., Ding S., Wu D., Zhang M., He Q. Air-water two-phase flow regime and transition criteria in vertical upward narrow rectangular channels // *Progress in Nuclear Energy*. 2021. (136). Pp. 103750.
2. Wang G., Zhang M., Dang Z., Ishii M. Axial interfacial area transport and flow structure development in vertical upward bubbly and slug flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. (169). Pp. 120919.
3. Jagan V., Sathesh A. Experimental studies on two phase flow patterns of air-water mixture in a pipe with different orientations // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2016. (52). Pp. 170 - 179.
4. Kitagawa A., Denissenko P., Murai Y. Effect of heated wall inclination on natural convection heat transfer in water with near-wall injection of millimeter-sized bubbles // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. (113). Pp. 1200 - 1211
5. Gorelikova A, Randin V, Chinak A. Bubble diameters variation along the gas-liquid flow in a flat channel at various inclination angles // *Thermophysics and Aeromechanics* (2020) 27(5) 767-773

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теплофизики СО РАН по программе No 121032200034-4.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ С ФАЗОПЕРЕХОДНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ**

Дибиров Я.А., Зейналов М.Ш.

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики - филиал ОИВТ РАН,  
пр. Шамиля, 39а, Махачкала, 367030, Россия

Главным сдерживающим фактором широкого применения энергоустановок, предназначенных для сушки свежей плодоовощной продукции, является необходимость в значительных энергозатратах для их круглосуточного функционирования. Одним из эффективных способов решения данной проблемы является применение тепловых аккумуляторов, заряжаемых тепловой энергией солнечной радиации.

Целью работы являлось испытание в естественных климатических условиях ранее разработанного экспериментального образца установки солнечного воздухонагревателя с применением фазопереходного теплового аккумулятора, заряжаемого тепловой энергией солнечной радиации.

Воздухонагреватель состоит из корпуса, выполненного из влагостойкого многослойного листа фанеры и представляющий собой в плане восьмиугольник, остекления, теплового аккумулятора, изготовленного из горизонтально установленных герметичных контейнеров, заполненных фазопереходным теплоаккумулирующим составом. К нижнему и верхнему торцам корпуса прикреплены патрубки, в которых соответственно установлены канальный вентилятор (для закачки в заданном режиме воздуха из окружающей среды) и термоанемометр (для измерения температуры и скорости нагретого воздуха, непосредственно подаваемого потребителю). Днище и боковая поверхность корпуса воздухонагревателя покрыты различными теплоизоляционными материалами из листового пеноплекса и рулонного фольгоизола. По обе стороны аккумулятора (между остеклением и поглощающей поверхностью аккумулятора, и между аккумулятором и теплоизоляцией днища корпуса воздухонагревателя) оставлены зазоры для свободного прохождения нагретого воздуха.

Регистрацию температуры по входным сигналам от термопар, установленных в различных точках по ходу движения нагреваемого воздуха, производилось универсальным измерителем-регулятором ТРМ136. Прибор имеет встроенный сетевой интерфейс RS-485 с шестью подключенными входными первичными преобразователями (датчиками), что дает возможность снимать данные температур до шести точек одновременно.

Фиксацию в реальном времени температуру корпуса и скорость циркулируемого теплоносителя (нагретого воздуха) обеспечивался установленным внутри выходного патрубка термоанемометром UNIT UT362.

Поступление воздушного потока из окружающей среды в установку на заданной скорости обеспечивался канальным вентилятором модели *DEERCOOL XFAN 120*, установленным внутри входного патрубка.

Натурные испытания экспериментального образца солнечного воздухонагревателя проводились в яс-

ные солнечные дни за период апрель - сентябрь 2022 г. на крыше здания ИПГВЭ в Махачкале.

При испытаниях датчики термопар были установлены в следующей последовательности: 1 - воздуха на входе в солнечный воздухонагреватель; 2, 3 и 5 - соответственно, корпусов начального, среднего и последнего по ходу движения теплоносителя трубчатых контейнеров с теплоаккумулирующим составом; 4 - внутри теплоаккумулирующего состава среднего трубчатого контейнера; 6 - воздуха на выходе из солнечного воздухонагревателя.

Результаты натурных исследований экспериментального образца установки солнечного воздухонагревателя с применением фазопереходного теплового аккумулятора, были переведены в графики, которые соответствует осредненным за один месяц (среднее значение за периоды начала, середины и конца определенного месяца). На горизонтальной оси графика отмечено время суток в часах, а на вертикальной оси - температура в °С.

Проведенный анализ результатов испытаний в естественных условиях экспериментального образца солнечного воздухонагревателя показал, что доля теплотерь в общей выработанной установкой тепловой энергии за одни сутки зависит не только от потенциала среднедневной суммарной солнечной радиации, но и от среднесуточной температуры наружного воздуха в месте конкретного расположения установки. Так, для климатических условий Махачкалы при принятых технических решениях теплоизоляции наружных поверхностей установки круглосуточное поддержание заданной температуры теплоносителя (нагретого воздуха) на выходе из воздухонагревателя можно обеспечить только за короткий период года (примерно со второй половины мая до середины августа).

Проведенные расчёты показали, что даже в летние месяцы (с максимальными значениями поступления солнечной энергии и температуры наружного воздуха) суточные теплотери составляет более 40% от общей выработанной установкой тепловой энергии, что обусловлено в первую очередь недостаточной эффективностью примененных для тепловой изоляции материалов. Примерно половина этих теплотерь приходится на теплотери через светопрозрачное покрытие (одинарное стекло).

## Список литературы

1. Атаназевич В.И. Сушка пищевых продуктов - М.: ДеЛи, 2000. - 295 с.
2. Искендеров Э.Г., Дибиров Я.А., Арбуханова П.А., Вердиев Н.Н., Зейналов М.Ш., Дворянчиков В.И. Установка термического анализа для исследования конденсированных сред // Вестник ДГУ Серия 1. Естественные науки. 2019. Том 34. Вып. 4. - С. 26 - 36.

Диева Н.Н.<sup>1</sup>, Кравченко М.Н.<sup>1,2</sup>, Мардахаяев Г.М.<sup>1</sup>, Пивоваров Д.Е.<sup>1</sup><sup>1</sup> РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,  
пр. Ленинский 65, Москва, 111991, Россия<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы 1, 119991, Россия

Работа посвящена совершенствованию гидродинамической модели, используемой для описания лабораторных и промышленных экспериментов по термохимическому воздействию (ТХВ) на карбонатные пласты углеводородов. Для реализации метода ТХВ в призабойную зону скважины закачивается определенный объем раствора азотогенерирующего состава (АГС) с добавлением инициатора реакции. В качестве АГС используется бинарная смесь, включающая аммиачную селитру и нитрит натрия. В основе технологии лежит организация непосредственно в пласте интенсивной экзотермической реакции разложения бинарной смеси, за счёт которой происходит нагрев породы, насыщение её продуктами реакции, в т.ч. азотом, изменение структуры и теплофизических свойств пластовой системы. Необходимой частью организации технологии является достижение управляемости процесса нарастания давления и температуры за счёт последовательной закачки оторочек стабилизаторов (замедлителей) реакции, рабочего состава, продавочных инертных жидкостей и катализаторов. В результате происходит выделение большого количества тепла с быстрым выделением горячих газообразных продуктов реакции, за счёт чего создаются волны высокого давления и температуры, стимулирующие повышение подвижности пластового флюида за счёт снижения вязкости фильтрата (в том числе за счёт фазового перехода отложений асфальтенов, смол и парафинов (АСПО) из твёрдого в жидкое состояние), повышение проницаемости за счёт образования вторичной сети трещин в просечно-железистой зоне пласта, растворении АСПО и взаимодействия кислотных составов, закачиваемых в виде отдельной оторочки с карбонатной матрицей породы. Гидродинамическое сопровождение всех этих процессов осложняется их быстротечностью, отсутствием экспериментальных исследований динамики изменения свойств пластовой системы, а также особенностей трёхфазной фильтрации воды, нефти и азота.

В отличие от разработанных ранее авторами моделей разного уровня [1] модифицированный подход позволяет рассчитать в динамике рост давлений и температур в зоне реакции в процессе разложения АГС. Модель базируется на учёте гидродинамики и термодинамики процесса с учётом как упругих, так и тепловых составляющих уравнений для всех фаз и кинетики фазовых переходов разложения АГС и растворения АСПО и карбонатной части породы.

Как показали статические эксперименты, реакция разложения является самоускоряющейся и экспоненциально зависящей от температуры. Проведенный авторами анализ результатов [2] и сопоставление диапазона реализуемых давлений и температур с фазовой диаграммой азота указывает на фазовое состояние газа в виде сверхкритической жидкости, ко-

торое модифицированной модели описывается уравнением состояния в форме Ми-Грюнайтзена. Также в рамках настоящей работы предполагается, что высокие давления и температуры в условиях слабой растворимости азота в нефти пористой среде будут благоприятствовать формированию нефтеазотной эмульсии.

Численный расчёт развития АГС разделен на три этапа. Первый - расчёт параметров химической реакции в зависимости от пластовых условий и концентраций активных агентов, с учётом уровня тепловыделения и теплопоглощающей способности всех фаз (скелета и насыщающего водонефтяного флюида). В рамках второго этапа производился гидродинамический расчёт последовательной закачки оторочек компонентов АГС и развития химических реакций, приводящих в динамике к перераспределению давления и температуры и изменению фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора. По результатам третьего этапа делались выводы об эффективности технологии, путём гидродинамического расчёта пластовых параметров на этапе перевода скважины в режим добычи. Данные для расчёта насыщенного пласта принимались по открытым источникам, описывающим один из нефтепромысловых участков «РН-Юганскнефтегаз».

В результате численного исследования было установлено, что процесс закачки АГС даёт повышенные температуры сохраняются в пласте пролонгированность теплового эффекта более 6 месяцев, а наряду со снижением фильтрационного сопротивления призабойной зоны приводит к повышенным уровням нефтедобычи более чем 1,5 года, что соответствует промышленным данным.

Использование в расчётах модифицированной модели показало относительное отклонение накопленной добычи на величину порядка 8% в сравнении с предыдущей версией прогнозных расчётов от модели [2], что в большей степени отвечает промышленным экспериментам. Проведённая оценка накопленной добычи, для условий промышленного участка «РН-Юганскнефтегаз» показала увеличение накопленной добычи только за 6 месяцев эксплуатации в 2,5 раза.

#### Список литературы

1. M.N. Kravchenko, N.N. Dieva, G.A. Fatykhov Hydrodynamic Analysis of Pyrolytic Studies for the Kerogen-Containing Rocks of Romashkinskoye Field. // Springer Geology. 2021. № 3. С. 273
2. М.Н. Кравченко, Н.Н. Диева, Е.Г. Разбегина, А.Д. Малова Моделирование фильтрационных процессов в нефтяном пласте с учетом экзотермической реакции разложения закачиваемого активного состава. // Всероссийская конференция молодых ученых-механиков (YSM-2021) Сочи, «Буревестник» МГУ, 3-12 сентября 2021 г.

*Работа поддержана РНФ  
(грант № 22-77-10081).*

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕЖИМОВ ПУЗЫРЬКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ С КАСКАДОМ ВНЕЗАПНЫХ РАСШИРЕНИЙ

Евдокименко И.А.<sup>1,2</sup>, Лобанов П.Д.<sup>1</sup>, Блель В.<sup>2</sup>, Джентрик К.<sup>2</sup>, Си-Ахмед Э-К.<sup>2</sup>,  
Легран Д.<sup>2</sup>, Марэк Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1  
<sup>2</sup> Nantes Université, CNRS, GEPEA, UMR 6144, ,  
44600, France, Saint-Nazaire, 37 Bd de l'Université

Определение различных режимов течения и их переходов является важным аспектом для оценки гидродинамических характеристик пузырьковой колонны. В классических пузырьковых колоннах можно выделить три основных режима течения: монодисперсный, переходный и полидисперсный [1-3]. Информация о режиме течения позволяет охарактеризовать такие важные гидродинамические параметры, как истинное газосодержание и время перемешивания в канале. Изменение геометрии канала оказывает влияние на смену режимов течения и процессы переноса тепла и массы в барботажной колонне.

Целью данной работы является идентификация режимов течения пузырькового потока в прямоугольной барботажной колонне с каскадом внезапных расширений.

В качестве экспериментального стенда использовался прямоугольный реактор из оргстекла с размерами 200x50x800 мм, который был заполнен рабочей жидкостью (водой) до уровня 530 мм. Дисперсной фазой служил сжатый воздух, подаваемый в канал из компрессора через 36 капилляров, установленных в основании канала. Подача газа регулировалась массовым расходомером с максимальным расходом газа 60 л/мин. Приведенная скорость газа в эксперименте составляла от 0 до 9 см/с. Измерение истинного газосодержания в канале проводилось при помощи метода измерения дифференциального давления ( $\Delta H = 500$  мм).

Оргстеклянные ступени прямоугольного сечения имели размеры 40x10x200 и устанавливались на трёх различных высотах канала, как по одну, так и по обе стороны канала, создавая серию внезапных расширений и сужений. Количество ступеней в работе варьировалось от 1 до 6. Полученные данные сравнивались с данными для пузырьковой колонны с прямыми стенками. Визуализация течения осуществлялась с помощью метода теневой съемки цифровой камерой.

В ходе работы были получены результаты по измерению истинного газосодержания. Для идентификации режима течения и для дальнейшей валидации результатов было использовано три различных метода: метод роста газосодержания, как функции приведённой скорости газа, метод дрейфового потока и метод визуального наблюдения.

Для всех геометрических конфигураций канала было показано существование трёх режимов течения. Монодисперсный режим течения соответствует об-

ласти малых приведенных скоростей газа (до 2 см/с). При данном режиме течения, пузыри имеют сферическую форму и практически не взаимодействуют между собой. Стоит отметить наличие рециркуляционных зон перед ступенями, где пузыри могут изменить свою траекторию движения.

При увеличении приведённой скорости газа растёт и истинное газосодержание в канале, что влечёт за собой смену режимов. Показано, что при переходном режиме течения пузыри, при прохождении через сужение канала, могут собираться в кластеры, которые сразу же разрушаются после выхода из сужения. Также выявлено увеличение зоны рециркуляции перед ступенями. Необходимо отметить, что за уступом всегда имеется свободный от газа слой жидкости.

При полидисперсном режиме течения поток становится неустойчивым. Это связано со значительным ростом приведённой скорости газа и взаимодействием между пузырями. Процессы коалесценции и дробления происходят значительно чаще, чем в предыдущих режимах. Это приводит к более широкому распределению размеров пузырей. Необходимо отметить, что истинное газосодержание в конфигурациях с высоким количеством расширений меньше, чем в канале без модификаций. Предполагается, что это связано с более высокой интенсивностью перемешивания, которая усиливает процессы коалесценции.

Были проведены эксперименты по идентификации режимов пузырькового течения в прямоугольном канале при наличии каскада внезапных расширений в канале. Показано существование трёх режимов течения для всех исследуемых конфигураций канала.

Ведение препятствий в поток позволяет улучшить перемешивание в канале, что может привести к интенсификации процессов тепло- и массообмена.

*Работы выполнены в рамках госзадания ИТ СО РАН.*

### Список литературы

1. N. Thomas, "Effect of bubble column dimensions on flow regime transition," Chem. Eng. Sci., Jan. 2001, Accessed: Jun. 28, 2022.
2. E. Olmos Midoux, Institut national polytechnique de Lorraine, "Étude expérimentale et numérique des écoulements gaz-liquide en colonne à bulles," 2006.
3. W.D Deckwer, Bubble Column Reactors, Wiley. New York, 1991.

**ПРОГРАММИРУЕМОЕ ОСАЖДЕНИЕ СУСПЕНЗИИ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ТОЧЕЧНОМ НАГРЕВЕ**

Егоров Р.И., Зайцев А.С.

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

Распределение дисперсной фазы суспензии по её объёму со временем меняется вследствие воздействия гравитации. В отсутствие течений осаждение имеет случайный характер и приводит к образованию на дне кюветы диффузного слоя, чьё распределение по площади подложки достаточно близко к равномерному.

Под действием точечного нагрева малой области в центре дна кюветы, устанавливается конвективное течение [1], конфигурация поля скорости которого сильно зависит от толщины слоя (Рис.1а). В результате, режим осаждения частиц дисперсной фазы существенно изменяется [2].

В тонком цилиндрическом слое ( $h \ll R$ ) доминирует термокапиллярное течение Марангони, что выражается в формировании пары вихрей, занимающих практически всю поверхность слоя. Однако, несмотря на слабость термогравитационного течения Рэлея, в зоне взаимодействия вихрей Марангони существует достаточно сильный нисходящий поток, который прижимает частицы дисперсной фазы к подложке, усиливая их адгезию к поверхности. В результате возникает область компактного осаждения твёрдых частиц (Рис.1б). С ростом толщины слоя растёт скорость конвективного течения. При этом вклад термогравитационного течения в общую картину конвекции быстро становится все более весомым. Данный факт обуславливает рост производительности локального осаждения, который достигает пика при толщине слоя  $h \sim 0.3R$ .

При больших толщинах слоя суспензии нарастающие неустойчивости приводят к распаду больших вихрей Марангони и установлению хаотической вихревой картины течения. Это быстро приводит к тому, что осаждение становится менее локализованным, а слой уже осевших частиц размывается течением (Рис.1в). В результате, размер области, в которой существует плотный слой осажённых частиц, быстро уменьшается практически до нуля с ростом начальной толщины слоя суспензии.

Таким образом, управляя начальной толщиной слоя суспензии можно программировать режим осаждения дисперсной фазы суспензии. С учётом того, что мощность точечного нагрева составляет менее 1 Вт, максимальные температуры на поверхности жидкости не превосходят 60 °С. Это обуславливает достаточно слабое испарение жидкости, позволяющее поддерживать выбранный режим конвекции в течение длительного времени (до получаса). В итоге, можно добиться осаждения значительной доли дисперсной фазы суспензии.

Предложенный подход может использоваться для очистки жидкостей от взвешенных частиц без использования фильтров.

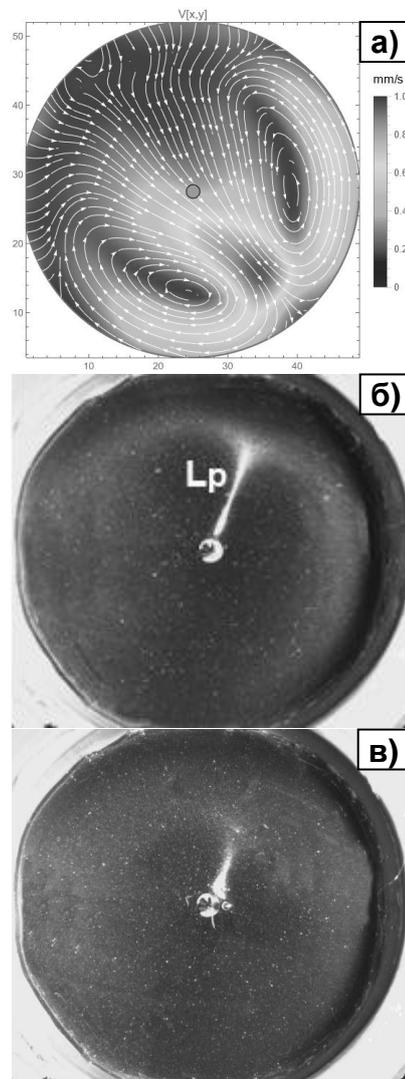


Рис. 1 Картина течения в тонком слое жидкости под действием точечного нагрева в центре при  $h=2,8$  мм (а). Осаждение частиц суспензии при различной высоте слоя жидкости: (б)  $h = 2.8$  мм; (в)  $h = 3.5$  мм.

#### Список литературы

1. Misyura S.Y., Egorov R.I., Morozov V.S., Zaitsev A.S., The behavior of heat transfer and entropy in a thin layer of liquid under laser heating, *Int. J. Therm. Sci.* 2023. V.185. 108048
2. Zhang J, Sun Z, Yang B. Self-assembly of Photonic Crystals from polymer colloids. *Curr Opin Colloid Interface Sci.* 2009. V. 14. P. 103–14.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-23-20056),  
а также грантом  
Администрации Томской области.*

## ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИИ МОЩНОСТИ НАГРЕВА НА КАРТИНУ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ТОЧЕЧНОМ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ

Зайцев А.С., Егоров Р.И.

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

Скорость конвективного течения преимущественно зависит от величины градиента температуры, существующего внутри слоя жидкости. Использование точечного нагрева слоя жидкости позволяет сформировать максимально резкие градиенты температурного поля в сравнении с тем, что можно получить при площадном нагреве кюветы.

В результате, в тонком цилиндрическом слое жидкости возникает течение, в котором доминирует термокапиллярная конвекция Марангони [1]. Мгновенное поле скорости представляет собой пару вихрей, занимающих практически всю поверхность слоя (Рис.1а).

В случае, если интенсивность нагрева меняется со временем, могут наблюдаться несколько различных эффектов. При высоких частотах модуляции интенсивности нагрева температурное поле не успевает следовать за изменениями интенсивности потока тепла вследствие существенной инерции процессов теплопереноса. Основным эффектом модуляции нагрева в данном случае является снижение максимальной температуры в слое жидкости и соответствующего замедления конвективного течения.

В случае, когда частота модуляции интенсивности нагрева не превышает 0.1 Гц, температурное поле в объёме жидкости начинает модулироваться синфазно с колебаниями интенсивности входящего теплового потока. На Рис. 1б показана модуляция температуры поверхности жидкости вблизи точки нагрева и вблизи боковой стенки для различных частот гармонической модуляции интенсивности входящего теплового потока. Видно, что температурное поле модулируется только вблизи точки нагрева, а на удалении порядка радиуса цилиндрического слоя наблюдается только снижение средней температуры.

Модуляция температурного поля приводит к возникновению неустойчивостей конвективных течений подобных тем, что возникают при увеличении толщины слоя жидкости. В результате пара больших вихрей Марангони распадается, порождая хаотические вихревые области. По-видимому, модуляция температурного поля во времени приводит к возникновению пульсаций скорости термогравитационного течения Рэлея, которые и обуславливают возникновение неустойчивостей в устойчивом ранее течении.

Таким образом, применяя модуляцию интенсивности нагрева можно переключать режим течения в слое жидкости фиксированной толщины, например, для управления режимом осаждения дисперсной фазы суспензии [2] или для управления производительностью поперечного теплопереноса в жидкостной системе охлаждения.

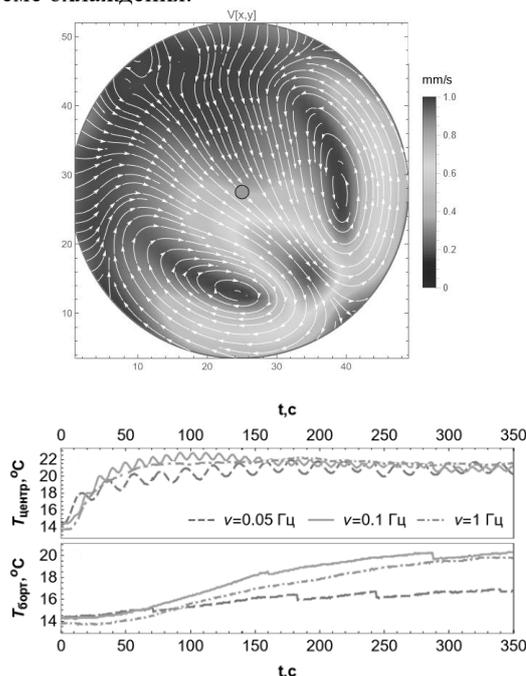


Рис. 1 Картина течения в тонком слое жидкости под действием точечного нагрева в центре при  $h=2,8$  мм (а). Модуляция температуры на поверхности жидкости в зависимости от частоты модуляции интенсивности нагрева.

### Список литературы

1. Misyura S.Y., Egorov R.I., Morozov V.S., Zaitsev A.S., The behavior of heat transfer and entropy in a thin layer of liquid under laser heating, *Int. J. Therm. Sci.* 2023. V.185. 108048
2. Zhang J, Sun Z, Yang B. Self-assembly of Photonic Crystals from polymer colloids. *Curr Opin Colloid Interface Sci.* 2009. V. 14. P. 103–14.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-23-20056),  
а также грантом  
Администрации Томской области.*

## ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ЩЕЛЕВОГО ЗАЗОРА НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ КАВИТАЦИИ

Скрипкин С.Г.<sup>1,2</sup>, Цой М.А.<sup>1</sup>, Кашкарова М.В.<sup>1</sup>, Кравцова А.Ю.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 2, Новосибирск, 630090, Россия

В высоконапорном гидротехническом оборудовании даже при обычных применяемых перепадах давления фактического расхода в щелевых зазорах зачастую возникает кавитация. Гидродинамическая кавитация вызывает нежелательные и разрушительное воздействие как внутри самого зазора [1-2], так, и выходя за его пределы, влияет на весь механизм в целом [3-6]. Длина щелевого зазора может варьироваться в значительной степени, тем самым, влияя на поток жидкости в ней. В данной работе рассмотрен вопрос о влиянии длины щелевого зазора на возникновение и развитие кавитации.

Характерный размер щелевого зазора как правило составляет несколько микрон и не превышает 1 мм [7]. Поэтому, рабочий участок экспериментального стенда имел ширину зазора характерного размера 1 мм и варьируемую длину,  $l$ . В центральной области канала устанавливалось крыло, выполненное по полиному четвертой степени, и имеющем форму крыла NASA0012. Экспериментальное исследование проводилось с помощью высокоскоростной визуализации потока камерой photron fastcam s12. Измерение скорости потока во всей области щелевого зазора методом лазерной доплеровской анемометрии.

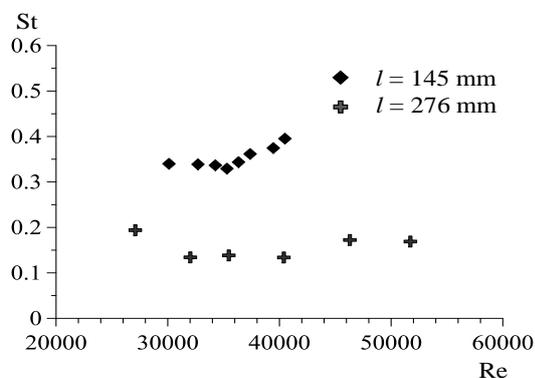


Рис. 1. Влияние длины щелевого размера на частотные характеристики схода кавитационной полости образующейся вблизи крыла NASA 0012.

На основе данных визуализации потока алгоритмическими методами анализа определялись длина и ширина парогазовой полости, её интенсивность, а также частоты отрыва каверн.

График изменения частоты отрыва кавитационной полости в зависимости от числа Рейнольдса для различных длин щелевого зазора представлен на рис. 1. Характерный диапазон схода каверн для щелевого зазора длиной  $l = 145$  мм лежит в области от 0,3 до 0,4. Для канала с большей длиной  $l = 276$  мм в области от 0,1 до 0,2.

По результатам исследования показано, что с увеличение длины щелевого зазора приводит к уменьшению длины парогазовой полости при равных числах Рейнольдса в потоке. А также снижению уровня интенсивности кавитации. При этом безразмерная частота схода парогазовой полости больше для более короткого щелевого канала.

## Список литературы

1. Tsoy M.A., Skripkin S.G., Naumov I.V., Kravtsova A.Y. High-speed visualization of cavities occurring behind a NASA0012 hydrofoil with low aspect ratio // Thermophysics and Aeromechanics, 2022, 29.
2. Skripkin S.G., Tsoy M.A., Kravtsova A.Y. Experimental Study of Cavitating Flow around a NASA 0012 Hydrofoil in a Slit Channel // Scientific Reports. 2022. V. 12. P. 11182.
3. Dorfler P., Sick M., Coutu A. Flow-induced pulsation and vibration in hydroelectric machinery // Springer London. 2012. 244 c.
4. Pereira J.G., Vagnoni E., Favrel A., Nicolet C., Avellan F. Prediction of unstable full load conditions in a Francis turbine prototype // Mech. Syst. Signal Process. 2022. V. 169. 108666.
5. Han H., Xiang L., Xu K., Geng D., Ren Z., Wu G., Liu S., Zuo Z. Influence of Tip Clearance on Cavitation Characteristics of an Inducer of Turbopump: CFD Study Processes. 2023. V. 11 (1). 55.
6. Skripkin S., Zuo Z., Tsoy M., Kuibin P., Liu S. Oscillation of cavitating vortices in draft tubes of a simplified model turbine and a model pump-turbine 1 B // Energies. 2022. V. 15(8). 2965.
7. Luo X.W. PhD Dissertation (Kitakyushu: Kyushu Institute of Technology) (2004).

Работа поддержана РФФ (грант № 19-79-10217-П).

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОВОЙ ФАЗЫ ПРИ КИПЕНИИ ГИДРОФТОРЭФИРА

Кукшинов Н.В., Дмитриева А.А., Морской Д.Н., Французов М.С.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
ул. 2-я Бауманская 5, стр. 4, Москва, 105005, Россия

Проведены экспериментальные исследования образования поверхности раздела фаз при кипении гидрофторэфира [1]. В процессе эксперимента обеспечивался пузырьковый режим кипения, характеристики пузырьков определялись с помощью высокоскоростной съёмки.

### Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представляет собой герметичный сосуд с прозрачными стенками, что позволяет проводить скоростную видеосъёмку процесса кипения. В качестве поверхности кипения используется проволока диаметром  $d = 1$  мм. Подвод теплоты осуществляется за счёт подачи напряжения с помощью лабораторного автотрансформатора.

### Результаты исследования

Рабочая жидкость нагревалась до состояния насыщения, которое поддерживалось в течение эксперимента. Плотность теплового потока изменялась от  $2500 \text{ Вт/м}^2$  до  $60000 \text{ Вт/м}^2$ . Определялись размеры пузырьков при различных тепловых нагрузках и их статистические распределения по размерам. На рисунке 1 показан кадр высокоскоростной съёмки для  $q = 4280 \text{ Вт/м}^2$ . На рисунке 2 показано статистическое распределение размеров пузырьков для того же режима.



Рис. 1. Кадр высокоскоростной съёмки с определенными размерами пузырьков

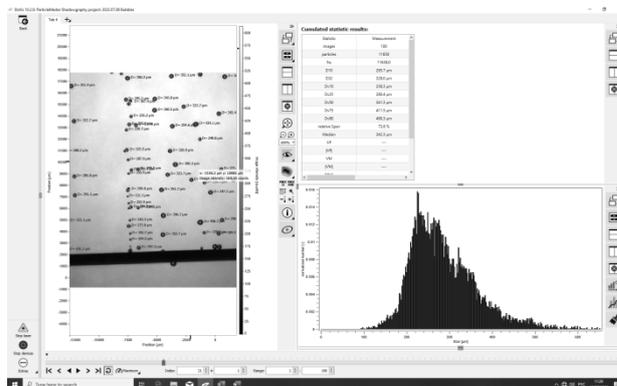


Рис. 2. Статистическое распределение размеров пузырьков

Для всех режимов были определены средние диаметры пузырьков и по этим данным была построена зависимость диаметра пузырька от температуры поверхности нагрева при кипении гидрофторэфира, а также предложена аппроксимирующая расчётная зависимость. На рисунке 3 представлены экспериментальные точки и аппроксимирующая зависимость.

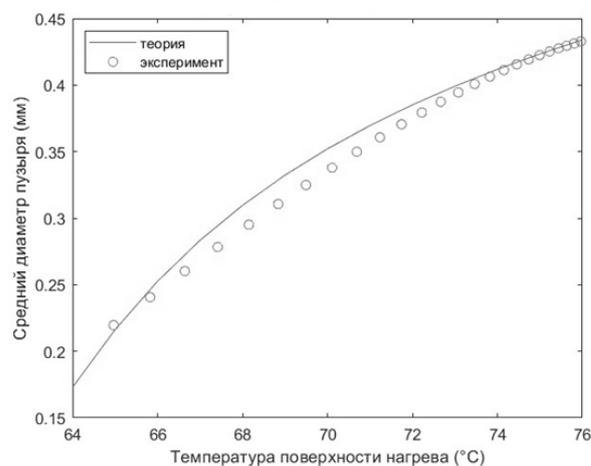


Рис. 3. Зависимость отрывного диаметра пузырька от температуры поверхности

### Список литературы

1. Cheng Liu, Hang Yu. Evaluation and Optimization of a Two-Phase Liquid-Immersion Cooling System for Data Centers. Energies 2021, 14, 1395.

## СОВМЕСТНЫЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН С СЕПАРАЦИЕЙ АЭРОЗОЛЕЙ В ОСЕВЫХ И ЗАКРУЧЕННЫХ ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВЫХ ПОТОКАХ ГАЗА И ЖИДКОСТИ

Лаптев А.Г.<sup>1</sup>, Фарахов М.И.<sup>2</sup>, Лаптева Е.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский государственный энергетический университет,  
ул. Красносельская 51, Казань, 420066, Россия,

<sup>2</sup> ООО «Инженерно-Внедренческий Центр «Инжехим»,  
ул. Эсперанто 62, Казань, 420107, Россия

На промышленных предприятиях и в энергетике в различных процессах применяются аппараты (скрубберы) охлаждения и очистки от дисперсной фазы технологических, природных и дымовых газов при непосредственном контакте с жидкой фазой (чаще водой). Применяются плёночные, насадочные, тарельчатые и вихревые аппараты. Наиболее эффективными по явлениям переноса являются вихревые аппараты, а также плёночные с высокоскоростными дисперсно-кольцевыми потоками при осевом и закрученном движении фаз (сильное взаимодействие фаз). Такие аппараты, находят применение, как для тепломассообмена [1], так и газоочистки от различного вида дисперсной фазы [2]. Процесс тепломассообмена и сепарации организуется при высоких скоростях газа (10-45 м/с) и происходит прямоочное восходящее или нисходящее движение жидкой фазы в виде закрученной пленки, а также газового потока с закруткой ленточным завихрителем. Газовый поток охлаждается за счёт механизма конденсации влаги и конвективного механизма при соприкосновении фаз. Например, авторы [3] применяют такие аппараты при охлаждении и очистки природного газа в местах добычи.

Целью работы является представление математической модели совместного процесса тепломассообмена и сепарации в осевом или закрученном дисперсно-кольцевом потоке в трубке диаметром  $d = 0,02 - 0,03$  м и длиной  $l = 0,2 - 1,0$  м.

Численная математическая модель построена на основе системы уравнений тепломассообмена с частными производными, которые записываются для газового потока и турбулентной плёнки раздельно с условиями сопряжения на границе раздела фаз четвертого рода. Для расчёта потоков теплоты и массы используется математическая модель турбулентного пограничного слоя [4], а для моделирования взята за основу система уравнений для осевого движения, но с учётом закрутки потока [5]. Сепарационная модель аэрозолей построена с применением теории турбулентно-инерционного осаждения частиц (турбулентной миграции) [6], а также с учётом центробежной силы, вызванной закруткой потока относительно центральной оси. В результате аналитического решения получены выражение для расчёта эффективности  $\eta_r$  сепарации только с учётом турбулентной миграции, а также выражение эффективности  $\eta_{\text{ц}}$  с учётом центробежного осаждения.

На рис. 1 представлены зависимости тепловой эффективности охлаждения дымового газа водой при противотоке, а также в и восходящем прямооток фаз. При скорости газа от 2,5 до 5,5 м/с происходит противоток пленки жидкости и газа, а при скорости бо-

лее 10 м/с восходящий прямооток. Из расчётов следует, что при противотоке тепловая эффективность находится в интервале  $E_r = 0,68 - 0,75$ , а при восходящем прямооток  $E_r = 0,86 - 0,95$ , при  $H = 1,0$  м и с одинаковой плотностью орошения водой ( $q_{\text{жс}} = 0,493$  м<sup>3</sup> / (м час)).

При этом необходимо учитывать, что при восходящем прямооток обеспечивается не только повышение  $E_r$  на 25-27%, но и производительности канала по дымовому газу в 6-12 раз.

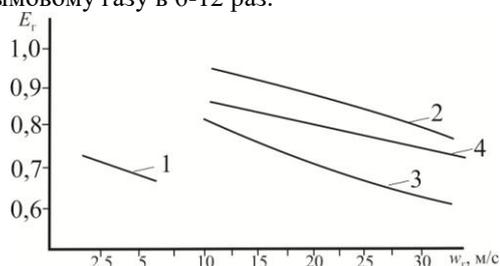


Рис. 1. Зависимость тепловой эффективности охлаждения дымового газа ( $T_{\text{гн}} = 150^\circ\text{C}$ ) водой ( $T_{\text{жн}} = 20^\circ\text{C}$ ) от скорости газа в канале диаметром  $d = 0,0168$  м.

1 – противоток фаз при слабом взаимодействии ( $H = 1,0$  м); 2 – восходящий прямооток фаз ( $H = 1,0$  м); 3 – восходящий прямооток ( $H = 0,5$  м). 4 – восходящий закрученный прямооток ( $H = 0,5$  м). Плотность орошения  $q_{\text{жс}} = 0,493$  м<sup>3</sup> / (м час)

Из расчётов следует (рис 1), что закрученное прямоочное движение фаз повышает эффективность теплообмена на 15-25% (линия – 4) по сравнению с восходящим прямоотком (линия – 3) при одинаковой длине канала ( $H = 0,5$  м).

### Список литературы

1. Войнов Н.А., Николаев Н.А. Теплообмен при пленочном течении жидкости – Казань: Изд. «Отечество», 2011. – 224 с.
2. Сугак, Е. В. Войнов Н. А., Николаев Н. А.. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами: –2-е изд. – Казань : Издательство "Отечество", 2009. – 224 с.
3. Ageev A.A., Yakhontov D.A., Kadyrov T.F., Farakhov M.M., Lapteva E.A. Mathematical model of dispersed phase gas separation in a combined equipment// Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Т. 55. № 7-8. P. 611-618.
4. Laptev A.G., Lapteva E.A. Numerical modeling of heat and mass transfer efficiency of the processes in turbulent foam layers in distillation// Journal of Engineering Thermophysics. 2016. Т. 25. № 4. P. 527-535.
5. Laptev A.G., Lapteva E.A. Numerical model of heat and mass transfer and separation of the dispersed phase in high-speed dispersed-annular flows of gas and liquid// Technical Physics, 2022, Vol. 92, No. 9. P. 1129- 1136.
6. Медников, Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей: – М.: Наука, 1980. – 176 с.

Работа поддержана РНФ  
(грант № 21-79-10406).

Лежнин С.И.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

Для проведения валидации и оптимизации численных кодов, описывающих поведение двухфазных потоков, большой интерес представляют упрощенные численные и аналитические модели поведения газовых включений. Это представляет интерес и для процессов, протекающих с растворением газов (биореакторы, например [1]), и для процессов с дегазацией или химическими превращениями (пиролиз метана в барботажной колонне, например [2]). При этом в установках соответствующие процессы могут проходить в диффузионном, кинетическом или смешанном режимах.

В работе предложены простые численные модели для описания поведения газовых пузырьков в двухфазном потоке при растворении газов, при химических процессах (например, при пиролизе метана). При этом исследуются процессы, происходящие как в кинетическом режиме (пиролиз метана в высокотеплопроводном расплаве), так и в диффузионном режиме (растворение газов). При моделировании рассматривается зависимость относительной скорости жидкой и газовой фаз от размеров и формы пузырьков, свойств жидкостей. Очень важно учитывать различие в растворимости газов в смеси (от малорастворимого метана до сильнорастворимого диоксида углерода). Основное приближение - квазистационарность протекающих процессов. То есть используются квазистационарные соотношения для относительной скорости фаз, коэффициентов локального массообмена и т.д..

На рис.1 в качестве иллюстрации представлены результаты расчётов по зависимости безразмерного диаметра всплывающих пузырьков при пиролизе метана от безразмерной высоты колонны. В данном расчёте скорость всплытия рассчитывалась при умеренных относительных Рейнольдсах (десятки-сотни). Зависимости представлены для двух различных высот колонн. Хорошо видна немонотонность в зависимости  $D(H)$ , особенно при большей высоте  $H$ . Модели учитывают «тонкие» эффекты, возникающие при всплытии пузырей, в тяжелом металле, связанные с резким падением давления (особенно при большей высоте колонки) в т.ч. ростом количества молей газа вследствие пиролиза.

При процессе растворения смеси газа для малых пузырьков (диаметром меньше "колмогоровского" размера) использовались модель массообмена с "диффузионным числом нуссельта равным 2". Для пузырьков большего размера наиболее приемлема модель с независимым от диаметра коэффициентом локального массообмена. Для случая, когда относительная растворимость газов в смеси является малым параметром получены асимптотические аналитические формулы для размера пузырьков при различных начальных относительных массовых долей газов.

Полученные в работе простые численные модели и аналитические формулы позволят с помощью численных кодов проводить многопараметрическую оптимизацию процессов при выборе различных целевых функций (жидкость, стоимость, габаритов установки, ее производительность и т.д.).

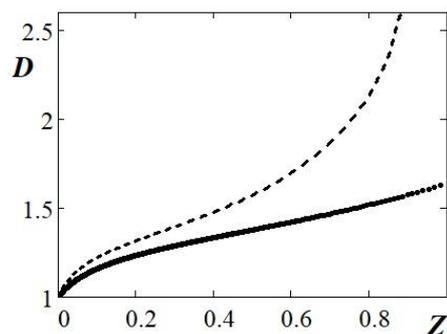


Рис. 1. Зависимость безразмерного диаметра пузырьков от безразмерной координаты  $Z$  в вертикальной колонне для пиролиза метана. Сплошная линия - высота колонны  $H = 1,5$  м, штриховая линия -  $H = 2,7$  м.

#### Список литературы

1. Starodumov I., Nizovtseva I., Lezhnin S. et al. Measurement of Mass Transfer Intensity in Gas-Liquid Medium of Bioreactor Circuit Using Thermometry Method // Fluids. 2022. V. 7, Issue 12, Paper 336. 12p.
2. Лежнин С.И. Некоторые аналитические решения задачи прямого пиролиза метана при производстве водорода // Теплофизика и Аэромеханика. 2022. Т. 29, № 3. С. 481-485.

Работа поддержана госконтрактом РФ с ИТ СО РАН (121032200034-4).

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ СНАРЯДНОМ ПОТОКЕ В МИНИКАНАЛЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Лукьянов А.А.<sup>1,2</sup>, Роньшин Ф.В.<sup>1,2</sup>, Воробьев М.А.<sup>1,2</sup>, Вожаков И.С.<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет

e-mail: a.lukyanov1@g.nsu.ru

В настоящее время одним из наиболее эффективных методов охлаждения микросистем являются мини- и микроканалы. В таких устройствах удаётся добиться улучшенного массо- и теплообмена за счёт большого отношения поверхности к объёму. Помимо микроэлектроники, миникальные устройства имеют большой потенциал использования во многих промышленных и технологических устройствах. Одним из основных режимов течения в миниканале является снарядный, такой режим имеет ряд преимуществ над другими: требуется меньший расход газа; при одинаковом расходе жидкости существенно снижается гидравлическое сопротивление за счёт меньшего расхода газа; способность отводить тепло от всей внутренней поверхности канала. Значительное количество теоретических и экспериментальных работ посвящено гидродинамике двухфазных течений, однако в литературе мало работ по исследованию характеристик теплообмена в снарядном режиме в миникалах. Данный вопрос является ключевым при исследовании эффективности системы охлаждения.

В литературе имеется множество исследований, в которых изучается поведение потока Тейлора, состоящего не из паровых пузырей, а из газовых [1]. Исследование теплопередачи в снарядном потоке, состоящем из неконденсируемого газа, показало его способность улучшать теплопередачу. Пузыри возмущают поле скорости внутри пробок, вызывая рециркуляцию, что увеличивает локальный перенос массы, импульса и энергии по сравнению с однофазным потоком. Экспериментальное выполнение точных измерений в потоке затруднено. В этом случае численное моделирование даёт возможность получить данные о тех параметрах, которые не поддаются измерению.

Численное моделирование снарядного течения в миниканале осложняется тем, что толщина пленки намного меньше характерных размеров снаряда. Тем не менее, достаточное разрешение плёнки жидкости является необходимым условием к корректному моделированию [2]. Когда инерционные эффекты значительны, форма пузыря претерпевает значительные деформации. В это время тонкий слой жидкости также значительно деформируется и требования к сетке ещё больше усиливаются.

Таким образом, целью данной работы является детальное численное моделирование снарядного потока и исследование его локальных характеристик вокруг пузырей, таких как трение на стенке и коэффициент теплообмена.

Моделирование проводилось с помощью открытого программного кода OpenFOAM на основе метода VOF. Суть этого метода состоит в том, что жидкость и газ представляют единую двухкомпонентную среду, где количество жидкости и газа в расчётной ячейке задается при помощи специальной функции.

Решение уравнений Навье-Стокса было выполнено при помощи встроенного решателя **compressibleInterFoam**. Он был применён для решения течений двух несжимаемых сред при условии постоянного значения плотности фаз, что справедливо для рассматриваемых потоков. Кроме того, использование этого решателя позволяет провести моделирование теплообмена со стенкой.

Для детального исследования течения в жидкой плёнке была использована подробная сетка со сгущением к стенке для разрешения мелких деталей в структуре течения [3]. Размер ячеек в сетке таков, что в области наименьшей толщины плёнки жидкости попадает от 7 до 10 ячеек.

В работе проведено численное исследование снарядного режима течения в квадратном миниканале со стороной 1 мм для различных соотношений расходных скоростей жидкости и газа, свойства которых соответствуют воде и воздуху. Расходная скорость жидкости варьируется от 0,05 до 0,5 м/с. Показано сравнение численных данных с экспериментальными. Получены подробные локальные характеристики течения при развитом движении серии пузырей Тейлора для капиллярного числа в диапазоне  $6 \cdot 10^{-4}$  -  $8 \cdot 10^{-3}$ .

Проведено измерение касательного напряжения на стенке канала в снарядном потоке в зависимости от расходных скоростей газа и жидкости. Показано, что при увеличении скорости газа увеличивается значение трения на стенке.

### Список литературы

1. R. Gupta, D. Fletcher, B. Haynes, Taylor flow in microchannels: a review of experimental and computational work // The Journal of Computational Multiphase Flows 2 (1) (2010) 1–31.
2. R. Gupta, D. F. Fletcher, B. S. Haynes, On the cfd modelling of taylor flow in microchannels // Chemical Engineering Science 64 (12) (2009) 2941–2950
3. Vozhakov, I. S., Lukyanov, A. A., Kochkin, D. Y., Ronshin, F. V. (2022). Experimental and numerical study of Taylor flow in a square minichannel. Physics of Fluids, 34(12), 122103.

*Исследование выполнено за счет гранта Российской государственной программы развития науки на 2021–2023 гг. № 21-79-10357, <https://rscf.ru/project/21-79-10357/>*

# КОНВЕКТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЙ СЛОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ С УЧЁТОМ ЗАКУПОРКИ И МОДУЛЯЦИИ ПОТОКА

Марышев Б.С., Клименко Л.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН,  
ул. Ак. Королева 1, Пермь, 614990, Россия

Транспортные процессы в пористой среде сопровождаются взаимодействием примеси с твёрдой матрицей среды, что замедляет процессы транспорта. Наиболее популярным в настоящее время подходом к описанию такого транспорта является МИМ (mobile/immobile media) подход. Для значительных концентраций примеси необходимо использовать нелинейный вариант МИМ модели с Ленгмюровской изотермой сорбции в случае, когда достигнуто динамическое равновесие [1]. Стоит заметить, что описываемый транспортный процесс имеет обратное влияние на фильтрационный поток флюида через пористую среду. Само наличие неподвижной фазы сокращает объём пор, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления среды или падению проницаемости, этот эффект описывается с помощью соотношения Козени-Кармана [2]. Фильтрация описывается с помощью стандартной модели Дарси-Буссинеска [3].

Решена задача о влиянии пульсаций потока на устойчивость однородного течения через горизонтальный слой пористой среды. Границы слоя считаются непроницаемыми, между ними задается постоянный перепад концентрации примеси. Путём специального выбора системы отсчёта для давления удалось свести влияние пульсаций к модуляции числа Пекле. Математически, в рамках предложенной модели, задача может быть записана в следующей безразмерной форме:

$$(1 - \zeta q) \left( \frac{\partial c}{\partial t} - \nabla^2 c \right) + \zeta \left( \frac{1}{C_0} - c \right) \frac{\partial q}{\partial t} = -\mathbf{U} \cdot \nabla c - \zeta \nabla q \cdot \nabla c,$$

$$\mathbf{U} = -\kappa (Pe \nabla p - Rp c \mathbf{j}), \quad \frac{\partial q}{\partial t} = a(1 - q)c - bq,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad \kappa = \phi^3 / (1 + \phi)^2, \quad \phi = \phi_0 (1 - \zeta q),$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{y=0,1} = -1, \quad \mathbf{U} \cdot \mathbf{j} \Big|_{y=0,1} = 0, \quad c \Big|_{y=0} = 0, \quad c \Big|_{y=1} = 1,$$

где вектор  $\mathbf{j}$  – единичный вектор, направленный против поля тяжести,  $\mathbf{U}$  – вектор скорости фильтрации,  $c, q$  – объёмные концентрации мобильной и немобильной компонент примеси, соответственно,  $p$  – отклонение давления от гидростатического распределения,  $\kappa, \phi$  – проницаемость и пористость среды. Задача содержит семь безразмерных параметров: безразмерные коэффициенты адсорбции и десорбции:  $a = C_0 \alpha L^2 / D$ ,  $b = \beta L^2 / D$ , число Пекле:  $Pe = \Delta P \gamma / (D \phi_0 \eta)$ , число Релея-Дарси:  $Rp = C_0 \rho \beta_c g \gamma L / (\eta D \phi_0)$ . Также присутствует пара-

метр закупорки  $\zeta = q_0 / \phi_0 \leq 1$  – описывающий долю пористости, которая может быть занята немобильной примесью при полном насыщении немобильной фазы (максимально возможная закупорка), пористость чистой среды  $\phi_0$  и перепад концентрация между границами слоя –  $C_0$ .

Показано, что задача допускает решение в виде пульсационного горизонтального переноса примеси, когда все поля зависят только от вертикальной координаты:  $\mathbf{U} = (\kappa Pe, 0)$ ,  $c = c^0(y)$ ,  $q = q^0(y)$ , такое решение зависит только от параметров  $a, b, \zeta$ .

Путем специального выбора системы отсчёта для давления удалось свести влияние пульсаций к модуляции числа Пекле:  $Pe \rightarrow Pe + A \sin \Omega t$ , где  $A, \Omega$  – амплитуда и частота модуляции. В случае, когда закупорка пористой среды значительна, равновесный профиль концентрации искривляется. Искривление тем значительнее, чем выше значения коэффициента адсорбции и параметра закупорки.

Рассмотрены малые возмущения режима однородной фильтрации. Получены нейтральные кривые в пространстве параметров системы, а так же зависимости частоты нейтральных возмущений от параметров. Построены карты режимов в пространстве параметров системы, а так же зависимости частоты и волнового числа наиболее опасных возмущений от параметров. Показано, что зависимости критического числа Релея-Дарси и критической амплитуды пульсаций от частоты имеют характерный вид «мешков», которые часто наблюдаются в случае параметрического возбуждения колебаний. Это объясняется тем, что в отсутствие пульсаций наблюдается колебательная неустойчивость режима однородной прокачки. Установленный характер неустойчивости пульсационного потока позволяет говорить о возможности эффективного управления устойчивостью одномерного решения путем контроля амплитуды и частоты пульсаций.

## Список литературы

1. Selim H. M. Prediction of contaminant retention and transport in soils using kinetic multireaction models // Environ. Health Persp. 1989. V. 83, P. 69-75.
2. Carman P. C. Fluid flow through granular beds // Trans. Inst. Chem. Eng., 1937. V. 15. P. 150-166.
3. D. A. Neld, A. Bejan Convection in porous media. Springer: New York. 2017. 988 p.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 20-11-20125).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НАСЫЩЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ С МИКРОРЕЛЬЕФОМ

Морской Д.Н., Кукшинов Н.В., Чирков А.Ю., Молчанов Т.И., Зубков Н.Н.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
ул. 2-я Бауманская 5, стр. 4, Москва, 105005, Россия

Проведены экспериментальные исследования интенсификации теплообмена при кипении в большом объёме воды и гидрофторэфира [1] на поверхностях с микрорельефом, полученным методом деформирующего резания [2].

### Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представляет собой герметичный сосуд, дно которого сформировано фланцем с рабочим участком. Рабочий участок (см. рис. 1) выполнен в виде медного стержня. К торцу стержня, обращённому в полость экспериментальной установки, припаивался образец с интенсифицирующей теплообмен кипением поверхностью. На противоположном конце стержня к его цилиндрической поверхности присоединены два кольцевых электронагревателя. В боковой поверхности стержня выполнены четыре отверстия, в которые вставлены термопары для определения плотности теплового потока, распространяющегося к поверхности кипения.

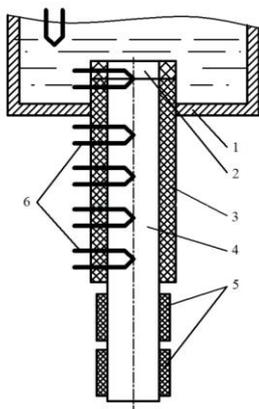


Рис. 1. Схема рабочего участка  
1 – сосуд; 2 – образец; 3 – теплоизоляция; 4 – стержень;  
5 – нагреватели; 6 – термопары

Цилиндрическая поверхность стержня теплоизолирована. Температура поверхности кипения определялась с помощью двух кабельных термопар, припаянных в месте стыка стержня и образца. На нижнем фланце закреплены также вспомогательный электронагреватель, необходимый для поддержания рабочей жидкости в состоянии насыщения, и термопара для измерения температуры жидкости.

### Методика проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных

Рабочая жидкость нагревалась до температуры насыщения, которая поддерживалась в течение эксперимента. С помощью лабораторного автотрансформатора на кольцевые электронагреватели подава-

лось определённое напряжение. В ходе эксперимента ступенчато изменялась плотность теплового потока в диапазоне 5 – 350 кВт/м<sup>2</sup> посредством регулирования напряжения на электронагревателях. По достижении стационарного теплового режима фиксировались показания термопар, после чего устанавливалось следующее значение плотности теплового потока.

По показаниям термопар, установленных в стержне, вычисляется градиент температуры вдоль оси стержня и уточняется плотность теплового потока, подводимого к образцу. По измеренной температуре на стыке стержня и образца с помощью закона Фурье вычисляется температура поверхности кипения. Коэффициент теплоотдачи определялся с помощью закона Ньютона-Рихмана.

### Результаты исследования

Получена база данных по зависимостям коэффициентов теплоотдачи от плотностей теплового потока и температурного напора для всех исследуемых поверхностей. На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для двух микроструктур в сравнении с гладкой поверхностью. Показано, что при плотностях теплового потока 200-250 кВт/м<sup>2</sup> исследуемые поверхности обеспечивают значения коэффициентов теплоотдачи в 4 раза выше, чем в случае гладкой поверхности.

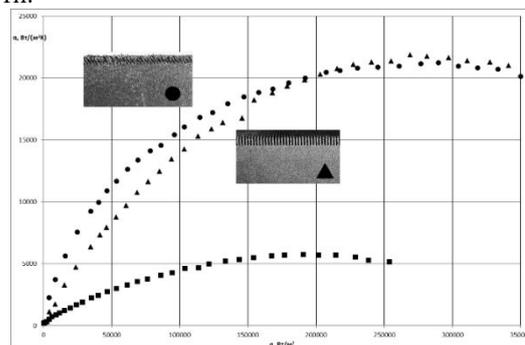


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока (■ - гладкая поверхность, ● - штырьковая микроструктура, ▲ - ребра)

### Список литературы

1. Cheng Liu, Hang Yu. Evaluation and Optimization of a Two-Phase Liquid-Immersion Cooling System for Data Centers. *Energies* 2021, 14, 1395.
2. Патент на изобретение № 2679815. РФ. Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. Способ получения развитой штырьковой теплообменной поверхности. Заявлено 28.12.2017. Заявка: 2017146802. Опубликовано 13.02.2019. Бюл. № 5.

## РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ В ФОНТАНИРУЮЩЕМ И ПОТОЧНОМ РЕЖИМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Абаимов Н.А.<sup>1</sup>, Никитин А.Д.<sup>1</sup>, Симбирягин Л.В.<sup>2</sup>, Рыжков А.Ф.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет,  
ул. Мира 19, Екатеринбург, 620002, Россия

<sup>2</sup> ООО "Промышленный Перлит",  
ул. Владимира Высоцкого 4б, Екатеринбург, 620072, Россия

Получение синтез-газа с заданными свойствами, предназначенного для синтеза альтернативных видов топлив, является одной из важнейших задач для достижения технологических и климатических целей в ведущих секторах экономики (энергетика, транспорт). Синтетические жидкие топлива имеют существенно более высокие эксплуатационные характеристики (термостойкость, дымление, сажеобразование и др.) по сравнению с натуральными топливами, что необходимо для удовлетворения постоянно растущего уровня термодинамических параметров и экологических требований к транспортным (прежде всего авиационным) энергоустановкам. Работа направлена на разработку научных основ и технологии высокопроизводительного процесса получения биосинтез-газа с целью снижения углеродного следа и повышения эксплуатационных характеристик получаемых из синтез-газа синтетических жидких топлив для энергетики и транспорта.

Для достижения поставленной цели разработана лабораторная установка газификации биомассы в фонтанирующем и поточном режимах с расчётной производительностью по топливу 5-15 кг/ч.

Реактор состоит из корпуса (каркас из профильной стальной трубы, на котором закреплен оцинкованный лист), тепловой изоляции толщиной и футеровки из огнеупорного бетона толщиной. Рабочая температура футеровки до 1250°C. Реактор работает при атмосферном давлении и температуре 800-1100°C. Предусмотрено четыре входа для воздуха и два входа для топлива, что позволяет исследовать различные варианты подачи топлива и воздуха в реактор.

Воздух подается с помощью воздуходувки. Расход воздуха регулируется вентилем и измеряется ротаметром. Воздух подогревается электрическим нагревателем из нихромовой спирали до температуры 400°C. Топливо (сосновые опилки) подается шнеком с регулируемой частотой вращения из бункера. Соотношение топливо-воздух обеспечивает отсутствие сажи в газе. Высокая температура обеспечивает практически полное разложение смол, выделяющихся при пиролизе топлива.

Горячий синтез-газ на выходе из реактора поступает в камеру дожигания, где смешивается с воздухом, присасываемым за счет работы дымососа. Расход воздуха в камеру дожигания регулируется заслонкой. За счёт соотношения синтез-газ воздух в камере дожигания поддерживается температура около 800°C, что обеспечивает полное сжигание газа.

После камеры дожигания осуществляется присос воздуха для снижения температуры продуктов сгора-

ния до температуры 150-170°C. Охлажденные дымовые газы направляются дымососом в дымовую трубу.

Установки такого рода, работающие в фонтанирующем режиме позволяют получать синтез-газ с низшей теплотой сгорания до 5 МДж/м<sup>3</sup> на небогатом воздушном дутье. Такие данные, например, были получены на установке с фонтанирующим слоем квадратного сечения с расходом биомассы 4-17 кг/ч [1]. При переходе на работу в поточном режиме произойдёт переход к режиму частичной газификации и может понадобиться увеличение расхода топлива, как, например, в циклонном воздушном поточном газификаторе биомассы - 39-52 кг/ч [2].

Проведены холодные продувки установки и замерены поля скорости на разной высоте и разном удалении от оси реактора. Выполнено CFD-моделирование полученных результатов в программе OpenFOAM.

Для моделирования горячих пусков разрабатываются две новые CFD-модели: для поточного режима газификации на базе решателя *coalChemistryFoam*, а для фонтанирующего режима - *reactingTwoPhaseEulerFoam*. Данные решатели дополняются необходимыми подмоделями реакций газификации, кинетические константы для которых определяются на приборе термогравиметрического анализа (ТГА) для соответствующих топлив.

Осуществляются горячие пуски с обработкой фонтанирующего и поточного режимов с разными расходами топлива и коэффициентами подачи воздуха. Варьируются место и угол подачи воздуха в установку для управления процессом газификации. Проводятся отладка и валидация CFD-модели для масштабирования полученных результатов до уровня промышленной установки.

### Список литературы

1. Bove D., Moliner C., Curti M., Baratieri M., Bosio B., Rovero G., Arato E. Preliminary Tests for the Thermo-Chemical Conversion of Biomass in a Spouted Bed Pilot Plant // Can. J. Chem. Eng. 2018. V. 9999. P. 1-8.
2. Gabraa M., Pettersson E., Backman R., Kjellstrom B. Evaluation of cyclone gasifier performance for gasification of sugar cane residue—Part 1: gasification of bagasse // Biomass and Bioenergy. 2001. V. 21. P. 351-369.

*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".*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В МОДЕЛИ РЕАКТОРА КОНВЕРСИИ ДРЕВЕСНОГО ОПИЛА

Ершов М.И., Тупоногов В.Г., Никитин А.Д., Суворин И.Д., Рыжков А.Ф.

Уральский федеральный университет,  
ул. Мира 19, Екатеринбург, 620002, Россия

Древесный опил, как один из наиболее распространённых видов биомассы, является перспективным сырьем для получения газообразных и жидких углероднейтральных топлив. Вместе с тем создание устойчивых гидродинамических режимов в реакторе конверсии усложняется широким полидисперсным составом опила и разнообразной несферической формой частиц. В процессе термической конверсии изменяется массовая концентрация и размеры топливных частиц, что также приводит к изменению структурно-динамических характеристик газодисперсного потока.

В работе исследовались структурно-динамические характеристики газодисперсного потока в плоской прозрачной холодной модели реактора конверсии с размером горизонтального сечения 0,5\*0,02 м и сменным конусообразным основанием, через нижнее сечение которого подавался регулируемый расход воздуха. Экспериментальная установка оборудована измерительной системой, позволяющей производить видеосъёмку структуры дисперсного потока и компьютерную запись цифровых массивов пульсаций давления для последующей статистической обработки в программе Matlab. Длительность записываемых реализаций  $\tau = 5$  минут с частотой дискретизации 200 Гц. Эксперименты проводились на древесном опиле фракционного состава 0...3 мм с кажущейся плотностью частиц 520 кг/м<sup>3</sup> и отдельно на твёрдых продуктах его пиролиза с предварительным определением минимальных скоростей псевдооживления и витания для всех фракций. Высота насыпного слоя составляла 50, 100, 300 и 500 мм.

Результаты исследований показали, что по мере увеличения скорости продувки в момент перехода конусообразного слоя опила в псевдооживленное состояние его гидравлическое сопротивление в 1,4-1,5 раза превышает теоретическое сопротивление цилиндрического слоя. При дальнейшем увеличении скорости газа на пустое сечение прямоугольной части установки от 0,1 до 1,2 м/с происходит последовательная смена трёх режимов течения.

В интервале скоростей псевдооживления от 0,1 до 0,4 м/с наблюдается пузырьковый режим течения со средней порозностью слоя  $\varepsilon = 0,5-0,8$  и проскоком отдельных газовых пузырьков, размеры которых растут с увеличением скорости газа, увеличивая тем самым амплитуду (среднеквадратичное отклонение) пульсаций давления в слое. Основная частота в спектре пульсаций давления при этом несколько выше частоты гравитационных колебаний пузырькового слоя:

$$f = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{h}}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота колебаний,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  – высота слоя. Уменьшение основной частоты с увеличением высоты слоя согласуется с данной зависимостью.

В интервале скоростей 0,4-1,2 м/с устанавливался более интенсивный и турбулентный гидродинамический режим струйного фонтанирующего слоя с образованием центрального нестабильного струйного канала и периферийной зоны опускного движения твёрдой фазы, ширина которой увеличивалась с увеличением угла раскрытия конусообразного участка аппарата. Нестабильность струйного течения выражалась в возникающих пережимах и захлебываниях струи потоками твёрдых частиц и характеризовалась расширением частотного спектра пульсаций давления в интервале от 1 до 7 Гц и изменением среднеквадратичного отклонения от 14 до 21 Па для высоты засыпки 100 мм. Полученные характеристики согласуются с исследованиями [1,2].

При скоростях газа больше 1,2 м/с начинался унос мелких фракций опила, и с ростом скорости газа двухфазный поток переходил в более однородный режим пневмотранспорта, который мог поддерживаться только возвратом уносимого материала в установку шнековым питателем. Спектр пульсаций давления низкоконцентрированного потока с порозностью  $\varepsilon > 0,99$  расширялся в высокочастотную область без явно выраженной доминантной частоты при снижении среднеквадратичного отклонения до 8 Па.

Результаты исследования позволяют проводить выбор гидродинамических режимов для процессов термической конверсии древесного опила с необходимым пофракционным временем пребывания топливных частиц в аппарате и достаточной турбулентной интенсивностью и однородностью дисперсного потока.

*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".*

### Список литературы

1. Gryczka O., Heinricha S., Miteva V., Deen N.G., Kuipers J.A.M., Jacob M., Mörl L. Characterization of the pneumatic behavior of a novel spouted bed apparatus with two adjustable gas inlets // Chemical Engineering Science. 2008. V. 63. P. 791–814.
2. Liu M., Wen Y., Liu R., Liu B., Shao Y. Investigation of fluidization behavior of high-density particle in spouted bed using CFD–DEM coupling method // Powder Technology. 2015. V. 280. P. 72–82.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОМЕРЗАНИЯ ПОРОД, НАСЫЩЕННЫХ РАСТВОРОМ СОЛИ, С УЧЁТОМ ОСМОТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Рамазанов М.М.<sup>1,2</sup>, Булгакова Н.С.<sup>1</sup>, Лобковский Л.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики - филиал ОИВТ РАН,  
пр. Шамиля 39а, Махачкала, 367030, Россия<sup>†</sup>

<sup>2</sup> Институт динамики геосфер РАН,  
Ленинский проспект, 38, корпус 1, Москва, 119334, Россия

<sup>3</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
Нахимовский проспект 36, Москва, 117997, Россия

Понимание закономерностей, связанных с процессами промерзания горных пород, насыщенных раствором солей, имеют важное значение в связи с многочисленными практическими приложениями. Можно, например, отметить проблемы химического загрязнения поверхности в холодных регионах из-за захоронения различных жидких радиоактивных отходов в вечной мерзлоте [1]. В цитируемой работе на основе результатов физических экспериментов описаны особенности, характерные для взаимодействия мерзлых грунтов с растворами солей.

Согласно современным представлениям, в течении геологической истории вечная мерзлота испытывала чередование замерзания и оттаивания, в результате чего в ней формировалось большое количество закрытых «карманов» с гиперсолеными рассолами (называемых криопэгми). В тоже время, известно, что соленая морская вода и криопэги самым существенным образом способствуют разрушению и деградации вечной мерзлоты и, соответственно, интенсивному высвобождению метана в результате разложения метастабильных газогидратов, содержащихся в мерзлых породах в самоконсервированном виде [1]. Метан же является мощным парниковым газом и влияет на глобальное потепление [2]. Поэтому исследования закономерностей образования криопэггов при промерзании пород, насыщенных раствором солей весьма актуальны.

Существенным отличием предлагаемой нами модели является, то, что в ней учитывается осмос, связанный с градиентом концентрации соли который характерен для растворов и является мощным механизмом движения (миграции) растворов в слабопроницаемых пористых средах [3,4].

Постановка задачи. Имеется горизонтальный проницаемый пласт, насыщенный раствором соли с постоянной концентрацией и с заданной температурой. В некоторый момент времени на верхней границе температура падает ниже температуры замерзания при данном локальном давлении и данной концентрации раствора. Тогда сверху вниз будут распространяться два фронта замерзания раствора. Первый фронт — это граница между верхней полностью замёрзшей областью пласта и областью, где имеется и раствор, и лед, находящиеся в термодинамическом равновесии. Вторая граница — это граница между указанным равновесным частично замёрзшим слоем и областью, насыщенной жидким раствором рис.1. Требуется сформулировать математическую модель рассматриваемого процесса и исследовать законо-

мерности эволюции такой системы с учётом осмотической силы.

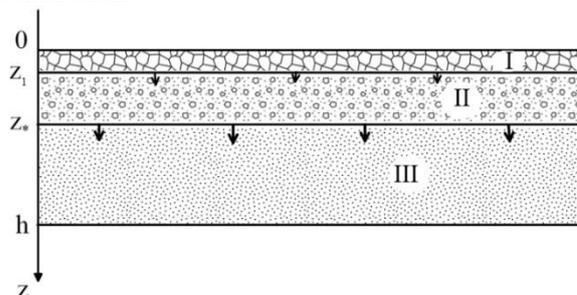


Рис.1 Схема задачи: I- замороженные породы содержащие лед; II- частично замороженная область пласта насыщенная льдом и раствором соли находящихся в термодинамическом равновесии; III- незамороженная область пласта насыщенная раствором соли;  $z = z_1(t)$  - подвижная граница области I;  $z = z_*(t)$  - фронт частичного замерзания раствора.

В результате проведенных исследований получено приближенное аналитическое решение задачи в автоматической постановке и изучены его свойства. Выведен математический критерий образования в мерзлых породах криопэггов. Показаны закономерности влияния осмоса на процесс промерзания пород и критерий образования криопэггов.

Показано, что при больших значениях осмотического коэффициента раствор вытягивается в промерзающую область из талой области, а при малых - напротив выталкивается. Выталкивающая сила связана с тем, что равновесное давление растёт с уменьшением температуры, а также с разностью плотностей воды и льда. Это вполне согласуется с результатами физических экспериментов, когда при промерзании глины, где осмотические свойства сильно выражены, вытягивают раствор, а пески - напротив выталкивают [1].

### Список литературы

1. Chuvilin E.M. Migration of ions of chemical elements in freezing and frozen soils // Polar Record. 1999. V.35 (192). P. 59—66. Printed in the United Kingdom.
2. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 190 с.
3. Рамазанов М. М., Каракин А. В., Лобковский Л. И. Математическая модель движения растворов с учётом осмотического эффекта // ДАН. 2019. Т. 489. № 1. С. 75—79.
4. Рамазанов М.М., Булгакова Н.С., Лобковский Л.И. Осмотическая конвекция// ДАН, Технические Науки. 2022. Т.504. №1. С.47-52.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-67-00025).

## ВЛИЯНИЕ УГЛА СМАЧИВАНИЯ И ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА РЕЖИМЫ СТЕКАНИЯ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ ПО ВЕРТИКАЛЬНОМУ ЦИЛИНДРУ

Сахнов А.Ю., Володин О.А., Печёркин Н.И., Павленко А.Н.

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

Стекающие плёнки широко распространены в различных технических устройствах для интенсификации процессов тепломассообмена. Контактный угол смачивания оказывает существенное влияние на режим растекания жидкости и, как следствие, на площадь смачиваемой поверхности. В работе [1] проведено моделирование стекающей плёнки воды на горизонтальных трубах при  $Re = \Gamma/v = 3$  и  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  методом VOF (здесь  $\Gamma$  – расход жидкости на единицу ширины пленки, м/с;  $v$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с). Для угла смачивания  $10^\circ$  авторы моделировали числа Рейнольдса 3, 6 и 9. Авторы работы [2] исследовали натекание плёнок раствора LiBr-H<sub>2</sub>O на горизонтальные трубы в более широких диапазонах числа Рейнольдса ( $3.5 < Re < 13.25$ ) и угла смачивания ( $0^\circ < \theta < 120^\circ$ ). В этих работах показано, что с увеличением угла смачивания характер распространения плёнки изменяется от струйного режима к капельному при фиксированном числе Рейнольдса. Подробный обзор исследований динамики стекающих плёнок представлен в статье [3]. В настоящей работе мы исследовали влияние контактного угла смачивания при числах Рейнольдса 50 и 104 на характеристики стекания плёнки смеси фреонов вдоль гладкого вертикального цилиндра на основе результатов трёхмерного численного моделирования двухфазного течения.

Рассматривалось растекание плёнки смеси фреонов R21 (мол. доля: 0.9) и R114 по четверти круглого вертикального цилиндра радиусом 25 мм и высотой 90 мм (рис. 1). Расчётный объём ограничивался мнимым цилиндром радиусом 26 – 30 мм в зависимости от угла смачивания. На верхней горизонтальной плоскости задавалась область с начальной толщиной плёнки жидкости  $\delta = 0.25$  мм и начальной скоростью жидкости  $V_0 = -0.048, -0.1$  м/с. С учётом свойств указанной смеси фреонов числа Рейнольдса равны 50 и 104, а числа Вебера равны 0.047 и 0.2 соответственно. Число Капицы для всех случаев течения составило 3801. Контактный угол смачивания  $\theta$  задавался от  $10^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом в  $20^\circ$ .

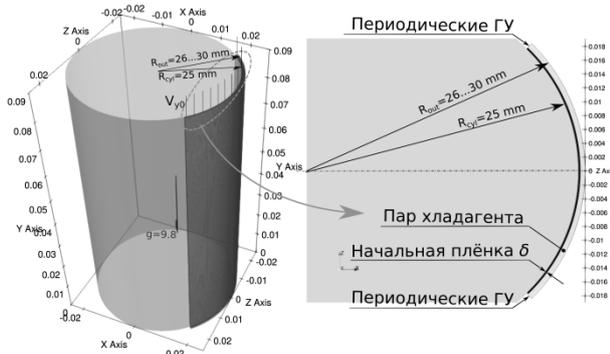


Рис. 1. Схема моделируемого течения.

Моделирование проводилось с применением метода объёма жидкости (VOF) [4] в пакете OpenFOAM. Использовалось приложение «compressibleInterFoam», включающее уравнения сохранения массы, импульса, энергии и переноса объёма жидкости.

На рис. 2 приведены зависимости величины смоченной поверхности цилиндра от времени в безразмерных координатах при углах смачивания от  $10^\circ$  до  $90^\circ$  и числах Рейнольдса 50 и 104. Безразмерная площадь определялась как отношение площади смоченной поверхности к четверти площади боковой поверхности цилиндра. Безразмерное время было получено через начальную скорость и толщину плёнки. Смоченная поверхность учитывает все области контакта жидкости и поверхности цилиндра, включая капли и различные струи. Оба параметра – число Рейнольдса и контактный угол смачивания – оказывают ключевое влияние на площадь смоченной поверхности.

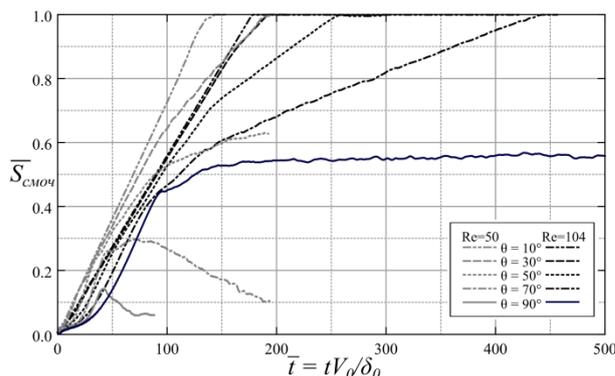


Рис. 2. Изменение площади смоченной поверхности во времени при различных углах смачивания и числах Рейнольдса.

### Список литературы

1. Ramadan Z. and Park C.W. Hydrodynamic behavior of liquid falling film over horizontal tubes: Effect of hydrophilic circular surface on liquid film thickness and heat transfer // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. V. 24. Paper No 10082.
2. de Arroiabe P. F., Martinez-Urrutia A., Peña X., Martinez-Agirre M., Mounir Bou-Ali M. Influence of the contact angle on the wettability of horizontal-tube falling films in the droplet and jet flow modes // Int. Journal of Refrigeration. 2018. V. 90. P.12–21.
3. Dai Z., Zhang Y., Wang S., Nawaz K., Jacobi A. Falling-film heat exchangers used in desalination systems: A review // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. V. 85. Paper No 122407.
4. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. V. 39(1). P. 201 – 225.

Моделирование свойств смеси хладагентов выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН, численное исследование стекания жидкости выполнено при финансовой поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер соглашения No 075-15-2021-575).

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ СНАРЯДНОГО РЕЖИМА В МИКРОКАНАЛЕ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Серёдкин А.В., Гобызов О.А., Ягодницына А.А.

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

Снарядный режим течения газожидкостных потоков и потоков несмешивающихся жидкостей в микроканалах широко применяется в различных устройствах: микротеплообменниках, микроэкстракторах, диспергаторах, анализаторах и сортировщиках биологических объектов и т.д. При работе таких устройств требуется информация о длине и скорости снарядов, на которые влияют геометрия микроканала, физические свойства жидкостей, их расходы, смачиваемость стенок канала. Известные на настоящий момент зависимости длины и скорости снарядов применимы для ограниченного диапазона капиллярных чисел и смачиваемости стенок микроканала. В случае, когда жидкости обладают неньютоновскими свойствами, в процессе работы изменяется смачиваемость стенок или физические свойства жидкостей, требуется активное управление длиной и скоростью движения снарядов в режиме реального времени. В настоящее время использование в задачах управления нейронных сетей, в частности, схемы обучения с подкреплением, набирает популярность благодаря возможностям нелинейного регулирования и работы с системами типа «черный ящик». В настоящей работе машинное обучение с подкреплением использовалось для достижения и поддержания требуемых параметров снарядного режима. В качестве регулируемых параметров задачи использовались приведённые расходы дисперсной и несущей фаз, а функция награды зависела от скорости движения и размера снаряда. Для решения задачи использовался алгоритм стохастической политики действий агента (нейросети) proximal policy optimization (PPO) из библиотеки OpenAI Gym [1]. На вход сеть получала текущие и целевые значения обезразмеренной скорости и длины снаряда. Физические свойства жидкостей, а также текущие расходы фаз оставались скрытыми параметрами. Обучение проходило в виртуальной среде, в которой длина снарядов моделировались согласно формулам Гарстецкого (1) [2] и Xu (2) [3], а скорость снарядов - степенной зависимостью скорости снаряда от суммарной среднерасходной скорости фаз (3).

$$L = 1 + k \frac{Q_d}{Q_c} \quad 1$$

$$L = \varepsilon + m \left( \frac{Q_d}{Q_c} \right)^\alpha \left( \frac{\sigma}{\mu_c} (Q_d + Q_c) \right)^\beta \quad 2$$

$$V = k_v (Q_d + Q_c)^\gamma \quad 3$$

где  $L$  – длина снаряда,  $v$  – скорость снаряда,  $Q_d$  и  $Q_c$  – скорости дисперсной и несущей фаз,  $\sigma$  – межфазное натяжение,  $\mu_c$  – динамическая вязкость несущей фа-

зы,  $k$ ,  $r$ ,  $\varepsilon$ ,  $m$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $k_v$  – параметры. Управление при помощи обученной нейросети позволило регулировать параметры снарядного режима течения, отмечается быстрое схождение параметров к задаваемой уставке.

На рисунке 1 показан пример регулирования режима в среде нейросетью с моделью течения Гарстецкого. Диапазон регулирования  $Q_d$  и  $Q_c$  ограничивался значениями от 0 до 1. Можно видеть достаточно качественный процесс регулирования. Шум на графике представляет собой искусственно наложенный случайный шум, моделирующий неидеальность измерений.

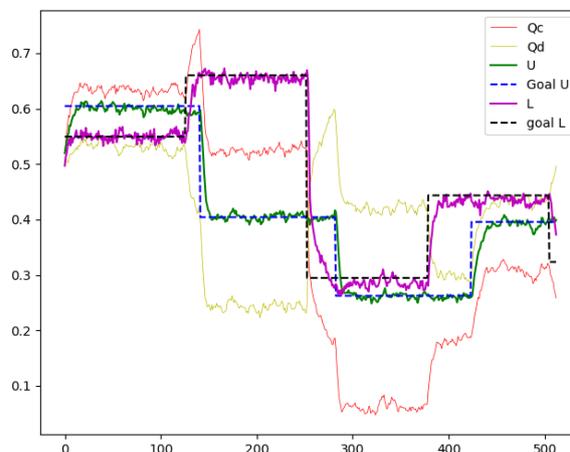


Рис. 1 Пример регулирования режима моделью в виртуальной среде с моделью течения Гарстецкого.

В работе показана возможность обучения модели управляющего устройства для микроканального течения в условиях моделирования режимов течения по известным физическим законам. Проведена оценка влияния различных параметров структуры нейросети и схемы обучения на качество регулирования. Определено характерное время схождения к уставке и уровень ошибки регулирования в различных условиях.

### Список литературы

1. <https://github.com/openai/baselines>
2. Garstecki, P., Fuerstman, M. J., Stone, H. A., & Whitesides, G. M. Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of break-up. // *Lab on a Chip* 6(3), 2006. 437-446.
3. Xu J.H., Li S.W., Tan J., Luo G.S. Correlations of droplet formation in T-junction microfluidic devices: From squeezing to dripping. // *Microfluid Nanofluidics*, 2008, 5:711–717

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-79-10307).*

## ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА НА ДИНАМИКУ ВСПЛЫТИЯ ОДИНОЧНОГО ПУЗЫРЬКА И ГРУППЫ ПУЗЫРЬКОВ В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ

Архипов В.А., Усанина А.С., Чуркин Р.А.

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

Эффективность многочисленных промышленных и технологических процессов, связанных с применением пузырьковых течений, определяется свойствами поверхности на свободной границе раздела фаз газ–жидкость. Физико-химические свойства на газожидкостной границе можно варьировать путем введения в жидкость поверхностно-активного вещества [1]. В частности, поверхностно-активное вещество применяется для повышения эффективности процесса обогащения полезных ископаемых в угольной промышленности, для повышения нефтеотдачи нефтяными пластами в нефтедобывающей промышленности и т.д.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса всплытия одиночного пузырька и группы монодисперсных пузырьков воздуха в дистиллированной воде в присутствии поверхностно-активного вещества. Экспериментальные исследования проведены для двух типов поверхностно-активного вещества: анионного (лаурилсульфат натрия) и неионогенного (синтанол АЛМ-10). Используемые поверхностно-активные вещества отличаются гидрофильной частью, которая обуславливает их принадлежность к соответствующему типу.

В экспериментах диаметр пузырьков, входящих в группу, варьировался в диапазоне  $d=(1.3\div 1.7)$  мм, начальная объемная концентрация группы пузырьков –  $C_v=4\cdot 10^{-4}\div 3\cdot 10^{-3}$ , диаметр группы пузырьков –  $D=(4\div 8)$  см, коэффициент поверхностного натяжения –  $\sigma=(32.5\div 72.5)$  мН/м

Проанализирована общая картина всплытия группы пузырьков в дистиллированной воде в присутствии поверхностно-активного вещества. В исследованном диапазоне чисел Рейнольдса  $Re=200\div 400$ , Вебера  $We=0.7\div 1.4$  и Марангони  $Ma=45\div 55$  получена критериальная зависимость (с коэффициентом детерминации  $R^2=0.99$ ) для скорости движения консолидированной системы монодисперсных пузырьков в растворе дистиллированная вода – синтанол АЛМ-10

$$\bar{u} = \frac{12.88 Re^{0.037} We^{0.21}}{Ma^{0.71}},$$

и вода – лаурилсульфат натрия

$$\bar{u} = \frac{12.08 Re^{2.61}}{We^3 Ma^{4.5}},$$

где  $Ma = RT\Gamma_\infty / u\mu_l$ ;  $R=8.314$  Дж/(моль·К) – идеальная газовая постоянная;  $T$  – температура;  $\Gamma_\infty$  – предельная адсорбция.

Проанализировано влияние природы поверхностно-активного вещества на траекторию всплытия и размер одиночного пузырька. Экспериментально показано, что пузырек в чистой воде (без поверхностно-

активного вещества) всплывает по спиралевидной траектории. При добавлении анионного поверхностно-активного вещества пузырёк движется по зигзагообразной траектории. При введении неионогенного поверхностно-активного вещества пузырёк, как и в случае всплытия в чистой жидкости, движется по спиралевидной траектории, но диаметр спирали уменьшается и длина завитка спирали увеличивается. При этом по мере увеличения концентрации поверхностно-активного вещества траектория пузырька становится почти прямолинейной.

По мере увеличения концентрации поверхностно-активного вещества наблюдается уменьшение размера одиночного пузырька. При этом в экспериментах обнаружено, что при заданном равновесном поверхностном натяжении анионное поверхностно-активное вещество приводит к большему уменьшению размера пузырька, чем неионогенное поверхностно-активное вещество. В исследованном диапазоне чисел Рейнольдса  $Re=200\div 600$  при снижении коэффициента поверхностного натяжения от 72 до 35 мН/м для анионного поверхностно-активного вещества наблюдалось уменьшение размера пузырька на 18.8 %, снижение скорости всплытия одиночного пузырька на 52 %, а для неионогенного поверхностно-активного вещества уменьшение размера пузырька составляло 6.1 %, снижение скорости всплытия одиночного пузырька – 42.7%.

Экспериментально показано, что при идентичных начальных условиях величина скорости всплытия группы монодисперсных пузырьков в присутствии анионного поверхностно-активного вещества отличается от значения скорости всплытия пузырьков при наличии неионогенного поверхностно-активного вещества в жидкости. Различие динамики всплытия группы пузырьков в присутствии поверхностно-активных веществ объясняется тем, что для используемого анионного и неионогенного поверхностно-активных веществ наблюдается разное время достижения равновесного поверхностного натяжения на свежесформированной поверхности раствора жидкость – поверхностно-активное вещество.

### Список литературы

1. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 2-е издание. 1959. 699 с.

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

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ В СЕТЯХ МИКРОКАНАЛОВ

Фазлетдинов С.У.<sup>2</sup>, Питюк Ю.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ООО «РН-БашНИПИнефть», Уфа

<sup>2</sup> Башкирский государственный университет, Уфа

e-mail: spartak.fazlet@gmail.com

Для изучения фильтрационных процессов в пласте обычно используют образцы кернов. Однако у керна исследования имеет свой ряд недостатков, такие как непрозрачность образца, специфичность отобранного участка, неоднозначность экспериментальных параметров, которые препятствуют фундаментальным исследованиям пластов в лабораторных условиях. Использование микромоделей позволяет напрямую наблюдать за течением флюидов на масштабе отдельных пор [1]. Например, заводнение ПАВ для выявления характеристик вытеснения и механизмов заводнения, таких как уменьшение межфазного натяжения, изменение смачиваемости [2].

В рамках данной работы для численного решения использовалась открытая интегрируемая платформа OpenFOAM. В качестве решателя был выбран *hybridPorousInterFoam*, в котором решается уравнение Дарси-Бринкмана [3].

В данной работе рассматривалась сеть каналов, представляющая из себя поросетевую модель размером 425 мкм x 828 мкм (рис. 1). Изначально модель была заполнена нефтью вязкостью 60 сПз и плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> и вытеснялась с левой стороны при постоянном расходе различными агентами вязкостью 1 сПз и плотностью 1000 кг/м<sup>3</sup>. При этом варьировались коэффициент поверхностного натяжения и контактный угол смачивания.

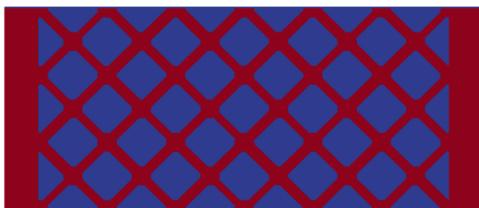


Рис. 1. Численная поросетевая модель

Были проведены расчёты для гидрофильной и гидрофобной модели (рис. 2). Из рис. 2 видно, что в случае гидрофобной поверхности происходит захват нефти в части каналов и пор из-за капиллярных сил, которые направлены против течения. Таким образом, в случае гидрофобной поверхности вытеснение охватывает незначительную часть порового пространства, в отличие от гидрофильной. Далее рассматривались различные агенты вытеснения нефти для гидрофобной модели с коэффициентами поверхностного натяжения: вода (0.027 Н/м), вода с ПАВ (0.02 Н/м), микроэмульсия (0.00001 Н/м) (рис. 3). Было обнаружено, что при использовании воды остаточная нефтенасыщенность в модели равна 67%, использование воды с ПАВ незначительно снижает остаточную нефтенасыщенность, до 66%. При использовании микроэмульсии удалось существенно снизить остаточную нефтенасыщенность до 14%.

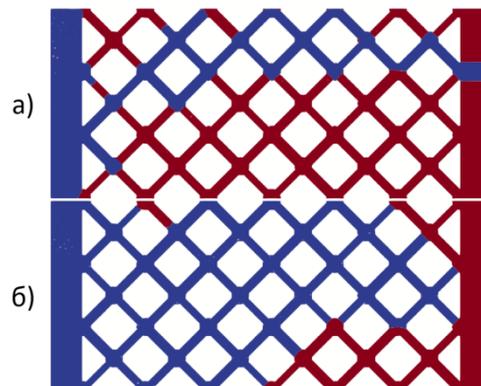


Рис. 2. Характерные картины вытеснения нефти водой в поросетевой модели для гидрофобной (а) и гидрофильной (б) поверхностей.

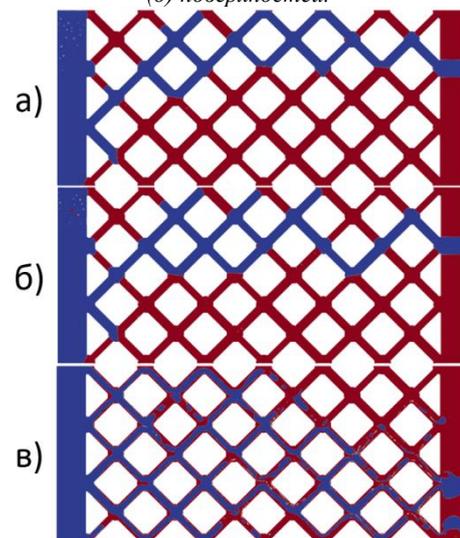


Рис. 3. Характерные картины вытеснения нефти водой (а), водой с ПАВ (б), микроэмульсией (в).

Результаты проведенной работы показывают, что предложенный подход для изучения фильтрации в поросетевых моделях можно использовать для выбора эффективного агента вытеснения с целью увеличения нефтеотдачи пласта.

### Список литературы

1. N. K. Karadimitriou and S. M. Hassanizadeh, A Review of Micromodels and Their Use in Two-Phase Flow Studies // *Vadose Zone Journal*, 2012, 11(3) DOI:10.2136/vzj2011.0072
2. Paul S. Hammond & Evren Unsal A Dynamic Pore Network Model for Oil Displacement by Wettability-Altering Surfactant Solution // *Transport in Porous Media*. 2012. Т. 92(3), P. 789–817. DOI:10.1007/s11242-011-9933-4
3. Carrillo F.J., Bourg I.C., Soulaire C. Multiphase flow modeling in multiscale porous media: An open-source micro-continuum approach // *Journal of Computational Physics*. 2020. V. X. 8:100073.

Работа поддержана РНФ  
(грант № 21-79-10212).

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ НАКЛОННЫХ УДАРОВ КАПЕЛЬ ПО ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ

Вожаков И.С.<sup>1</sup>, Черданцев А.В.<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН,  
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия

В работе рассматривается динамика удара быстрой капли по слою жидкости под малым углом к поверхности. Удары такого типа типичны для дисперсно-кольцевых газожидкостных потоков: газовый поток разрушает волновые структуры на поверхности плёнки жидкости, захватывая образовавшиеся капли и разгоняя их до скоростей, близких к скорости газа. В результате капли ударяют по поверхности плёнки жидкости под малыми (порядка нескольких градусов) углами. В недавней экспериментальной работе [1] при помощи стереоскопической модификации метода лазерно-индуцированной флуоресценции были обнаружены новые сценарии взаимодействия капли с поверхностью плёнки. Ключевую роль в таких сценариях играет покидание каплей начального кратера вследствие её высокой продольной скорости. Дальнейшая эволюция капли может сопровождаться формированием борозды на поверхности пленки с захватом пузырьков газа (пример такого удара показан на Рис. 1), отделением капли от плёнки с формированием жидкой нити или полотна, а также разрушением на облако мелких капель. Дополнительную сложность вносят волны на поверхности плёнки: реализация того или иного сценария зависит от параметров и фазы волны в точке удара.



Рис. 1. Удар капли с формированием борозды. Эксперимент [1].

Одним из способов улучшить понимание наблюдаемых процессов является численное моделирование явления. Целью настоящей работы является воспроизведение наблюдаемых в эксперименте событий в рамках численного моделирования для детального анализа взаимодействия капли с поверхностью пленки и изучения влияния различных факторов на динамику удара. Предшествующие попытки моделирования наклонных ударов без прямой привязки к экспериментам и широкого варьирования параметров представлены в работах [2-3].

Моделирование выполнено методом Volume of Fluid в рамках пакета *Basilisk*. Рассмотрены удары капель диаметром 0,5-1 мм по горизонтальному слою жидкости глубиной 0,5-5 мм со скоростями 15-30 м/с в диапазоне углов удара от 2 до 20 градусов. Дополнительно варьировались вязкость и поверхностное натяжение рабочей жидкости, профили скорости в газовой и жидкой фазах, волнение на поверхности пленки. Расчёты проводились в области длиной 10 мм с минимальным размером ячейки 10 мкм.

Пример расчёта удара капли с формированием борозды на поверхности пленки представлен на Рис. 2. Форма возмущения поверхности плёнки соответствует наблюдаемой в экспериментах. Фактически, борозда представляет собой серию близкорасположенных кратеров. Перемычки между кратерами формируют серию поперечных "морщинок", наблюдаемую в эксперименте. Малая глубина слоя жидкости подавляет рост кратеров. На финальных этапах взаимодействия капля отделяется от поверхности слоя, однако между каплей и слоем формируется жидкая нить, впоследствии распадающаяся на вторичные капли.



Рис. 2. Численный расчёт удара капли с формированием борозды (угол удара 5°).

На глубокой воде или при низком поверхностном натяжении возможен срыв вторичных капель вследствие роста и разрушения перемычек между кратерами. Увеличение вязкости жидкости препятствует отделению капли от поверхности слоя жидкости. Увеличение угла удара приводит к снижению вероятности выхода капли из кратера: при больших углах (15-20°) капля остается в кратере, и её энергия тратится на формирование короны и формирование вторичных капель. При этом решающее значение имеет локальный угол удара: при попадании капли на задний склон крупной волны капля не покидает кратера. Все результаты численных расчётов хорошо воспроизводят экспериментальные наблюдения, за исключением большого количества пузырьков, захватываемых при ударе с формированием борозды. Численная модель не воспроизводит такого захвата, и выяснение причин несоответствия является предметом будущих исследований.

### Список литературы

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 //Int. J. Multiph. Flow. – 2022. – Т. 150. – С. 104033.
2. Xie, Z., Hewitt, G.F., Pavlidis, D., Salinas, P., Pain, C.C., Matar, O.K. Numerical study of three-dimensional droplet impact on a flowing liquid film in annular two-phase flow //Chem. Eng. Sci. – 2017. – Т. 166. – С. 303-312.
3. Guo Y., Lian Y. High-speed oblique drop impact on thin liquid films //Phys. Fluids. – 2017. – Т. 29. – №. 8. – С. 082108.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-19-00755).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕМОДИНАМИКИ В ОКРЕСТНОСТИ АРТЕРИОВЕНОЗНОЙ МАЛЬФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССЕ НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ

Шарифуллина Т.С.<sup>1</sup>, Черевко А.А.<sup>1</sup>, Горбатов А.В.<sup>2</sup>, Панарин В.А.<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Национальный медицинский исследовательский центр имени академика Е.Н. Мешалкина,  
630055, Россия, Новосибирск, ул. Речкуновская, 15

<sup>3</sup> Медицинский центр ДВФУ (Дальневосточный Федеральный университет),  
690922, Россия, Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, 10, кор. 25

Церебральная артериовенозная мальформация (АВМ) является патологией развития сосудов головного мозга, при которой артериальное и венозное кровеносные русла соединены клубком беспорядочно переплетённых выродившихся сосудов. Это опасное заболевание, влияющее на функционирование головного мозга, при котором велик риск внутримозгового кровоизлияния.

Одним из методов лечения артериовенозной мальформации является эмболизация, представляющая собой внутрисосудистое заполнение клубка сосудов артериовенозной мальформации с помощью специального жидкого загустевающего вещества (эмболического агента) с целью блокирования кровотока через них. Данный способ хирургического вмешательства широко применяется, но до сих пор в некоторых случаях сопровождается периоперационным разрывом сосудов мальформации. В работе математическое моделирование процесса эмболизации рассматривается совместно с постановкой задачи оптимального управления этим процессом.

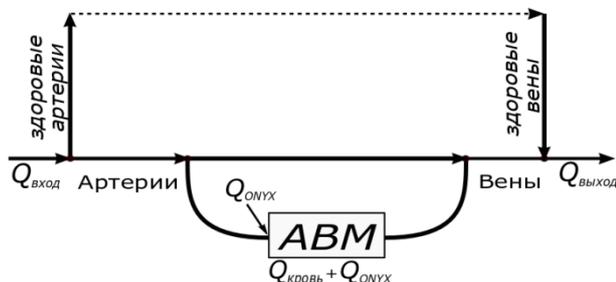


Рис. 1. Модель эмболизации АВМ, включенная в систему церебрального кровообращения

Одна из часто встречающихся разновидностей АВМ характеризуется наличием большого числа хаотически сросшихся тонких сосудов малых диаметров - рацемозный тип патологии. В этом случае патология может быть приближенно рассмотрена как пористая среда. Для описания течения внутри патологии используется математическая модель двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей через пористую среду, где вытесняемой фазой является

кровь, а вытесняющей эмболический агент. Наряду с течением крови и эмболического агента внутри АВМ учитывается перераспределение крови в окружающие здоровые сосуды (Рис.1). Получаемая система уравнений решается численно с помощью монотонной модификации численного метода SABARET [1]. В течении эмболизации поток крови, поступающий в АВМ, меняется за счёт перераспределения в соседние здоровые сосуды из-за увеличивающегося во время операции гидравлического сопротивления патологии. В постановке задачи этот эффект учитывается путем введения дополнительных нелинейных алгебраических соотношений.

Целью работы является отыскание оптимального способа проведения операции по эмболизации с точки зрения безопасности и эффективности. Целевой функционал и ограничения, возникающие в такой задаче оптимального управления, выбираются в соответствии с медицинскими показаниями, а управлением является объёмный расход эмболического агента, подаваемый на вход в АВМ. Сформулирована и для специального закона подачи эмболического агента численно решена задача оптимального управления эмболизацией.

Для установления тесной связи математической постановки задачи с клиническими приложениями при определении параметров и функций, входящих в модели, используются реальные клинические данные пациентов [1,2]. Результаты исследований могут использоваться для усовершенствования методики, выработки рекомендаций и повышения безопасности проведения нейрохирургических операций.

### Список литературы

1. Cherevko A.A., Gologush T.S., Petrenko I.A., Ostapenko V.V., Panarin, V.A. Modelling of the arteriovenous malformation embolization optimal scenario //Royal Soc. Open Sci. 2020. Vol. 7. №. 7. 191992. P. 1–16.
2. Khe A.K. et al. Monitoring of hemodynamics of brain vessels // J. App. Mech. Tech. Phys. 2017. Vol. 58. P. 763–770.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-11-00264).

## О ВЛИЯНИИ РАЗМЕРА КАПЛИ НА ПЕРИОД ИНДУКЦИИ РАЗРУШЕНИЯ ЕЁ В ПОТОКЕ ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Шебелева А.А.<sup>1</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
пр. Свободный 79, Красноярск, 660074, Россия

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

В настоящей работе проведено расчётное исследование влияния начального диаметра капли воды на динамику и период индукции разрушения её в потоке за ударной волной (УВ). Для этого проведена серия расчётов при фиксированном числе Вебера  $We = 400$  и варьируемом начальном диаметре капли воды  $d = 1,4; 2,8; 5,6$  мм. Расчётная область представляет собой параллелепипед с размерами  $3 \times 3 \times 5$  см. На одной из граней параллелепипеда задавалось условие входа с фиксированным значением скорости, на остальных гранях расчётной области задавались условия свободного выхода. В начальный момент времени на расстоянии 5 мм от входа в расчётную область помещалась сферическая капля воды, на которую воздействует проходящая ударная волна, генерирующая воздушный поток.

В расчётах использовались следующие физические свойства фаз: плотность и вязкость воды  $998,2 \text{ кг/м}^3$  и  $1,003 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м} \cdot \text{сек}$ , вязкость воздуха  $1,789 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м} \cdot \text{сек}$ . Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma = 0,073 \text{ Н/м}$ . Скорость потока варьировалась от 56 до 112 м/с, использовалась модель идеального газа. Используемая в работе методика моделирования, не требовательна к вычислительным ресурсам, для разрешения межфазной границы используется VOF метод, для описания турбулентности LES модель, для описания поведения межфазной границы на основных турбулентных масштабах применяется технология адаптированных динамических сеток.

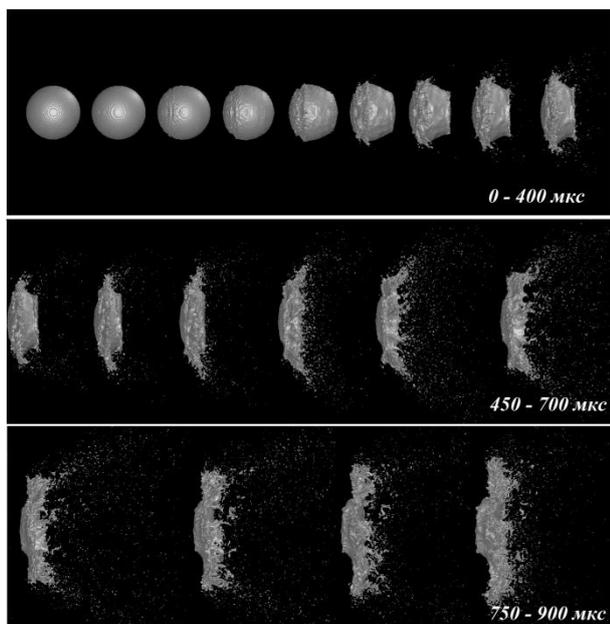


Рис. 1. Динамика разрушения капли воды за УВ.

На рис. 1 представлена динамика разрушения капли воды диаметром  $d_2 = 2,8$  мм в потоке за УВ, скоростью газа  $u_2 = 79,3$  м/с, для оценок задержки разрушения капли можно использовать эмпирическую формулу  $t_1 \sim t_0 \sim 0,36 \cdot d_2 / u_2 \cdot (\rho_{\text{liq}} / \rho_{\text{gas}})^{0,5} = 856$  мкс, где  $t_0$  – постоянная времени взаимодействия с потоком. Серия снимков на рис. 1 соответствует периоду пребывания капли в УВ 900 мкс, снимки сделаны через каждые 50 мкс. Ударная волна движется слева направо, деформируя каплю. Первый признак начала разрушения капли – это появление плёнки вниз по потоку. Это начинается проявляться на рис. 1 кадр 6 и отчетливо видно на кадре 7. Отсюда следует, что время индукции разрушения в данном случае  $t_2 = 275$  мкс. Отношение максимальной деформации капли к её начальному диаметру  $d_{\text{max}}/d_2$  в данном случае 1,319 мм. На рис. 2 представлено сравнение темпов роста миделя капель разных размеров. Как видно из графика, начальный диаметр капли практически не влияет на темп деформации.

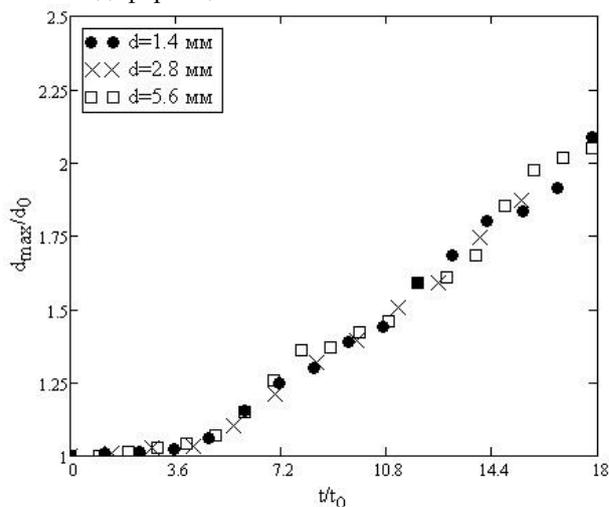


Рис. 2. Темп поперечной деформации капли воды.

В результате расчётов были получены зависимости безразмерного диаметра капли от времени распада, установлено время индукции разрушения, а также посчитана постоянная времени взаимодействия капли с потоком, для оценки задержки разрушения капель. Так, при начальном диаметре капли  $d_1 = 1,4$  мм, время индукции разрушения составляет  $t_1 = 120$  мкс, время взаимодействия капли с потоком  $t_{01} = 303$  мкс; при  $d_3 = 5,6$  мм, время индукции разрушения капли  $t_3 = 750$  мкс,  $t_{03} = 242$  мкс.

Исследование выполнено за счет гранта РФФ  
(грант № 23-79-30022).

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
ул. Букирева 15, Пермь, 614068, Россия

<sup>2</sup>Институт механики сплошных сред,  
ул. Ак. Королёва 1, Пермь, 614013, Россия

В работе приведены первые результаты экспериментального исследования зависимости поверхностного числа Релея от размерных параметров в задаче о механическом равновесии плёнки поверхностно-активного вещества, покрывающей участок плоской поверхности жидкости, находящейся под действием сдвигового течения однородного вдоль поперечной потоку координате, подтекающего под слой сурфактанта (SDSL shear-driven surfactant layer instability).

### Введение

Многофазные среды являются чрезвычайно популярным объектом научных исследований и находят широкое применение в различных технологических процессах. Несмотря на это их использование затруднено тем, что при наличии межфазной поверхности и молекул поверхностно-активного вещества (ПАВ) под действием адсорбционно-десорбционных процессов на границе раздела формируется мономолекулярная плёнка, в которой конвективные течения различной природы могут порождать вторичные движения в виде многовихревых структур [1-4]. В работе [5] на основе экспериментальных данных авторами был предложен безразмерный параметр

$$Ra_s = \left( \frac{\eta \rho U_0^3}{L} \right)^{1/2} \frac{L^3}{\nu \eta_s},$$

содержащий  $\eta$  - вязкость,  $\rho$  - плотность и  $U_0$  - скорость потока объемной фазы, а также  $\nu$ ,  $\eta_s$  - кинематическую и сдвиговую поверхностную вязкость слоя ПАВ,  $L$  - поперечный потоку размер плёнки сурфактанта. Данный параметр, названный поверхностным числом Релея, по мнению авторов, позволит описать поведение системы. Также в работе [5] была дана оценка критического значения  $Ra_s$ , при достижении которого возможна потеря механического равновесия с формированием вихревых структур.

Проведение более детального экспериментального исследования с варьированием размерных параметров задачи позволит подтвердить или опровергнуть правильность выбора безразмерного параметра и, как следствие, приведет к более глубокому пониманию физического механизма неустойчивости, возникающей в пленке ПАВ.

### Методика эксперимента

Конструкция экспериментальной кюветы позволяет варьировать ширину зоны, занятой слоем ПАВ,  $L$  в диапазоне от 0.5 до 6 см. Азимутально-однородное сдвиговое течение, подтекающее под слой сурфактанта, генерируется путем прокачки центробежным насосом высокоочищенной воды через

патрубок, расположенный в дне кюветы радиусом  $R_1 = 24$  см. Обтекая стенки полости, жидкость поднимается вверх до заградительного барьера радиусом  $R_2 = 15$  см. Упираясь в стенки барьера, восходящий поток, меняя направление, движется к центру ячейки вдоль её радиуса, создавая тем самым сдвиговое течение под слоем сурфактанта, который нанесен на кольцевую зону между барьером и центральным диском переменным радиусом  $R_3 = 9 \div 14.5$  см. Использование насоса позволяет варьировать скорость потока жидкости под застойной зоной в диапазоне от 0.1 до 10 см/с. Сток жидкости осуществляется через сообщающийся с центробежным насосом шланг, соосный патрубку подачи. Для визуализации течения используются частицы прокалённого талька, наносимые на поверхность искомой зоны, и/или полиамидные частицы нейтральной плавучести, добавляемые в объём. Трековые снимки фиксируются видеокамерой, закрепленной над кюветой. Перед нанесением ПАВ и распылением талька поверхность жидкости дополнительно очищается. После чего на границу раздела с помощью дозирующей пипетки наносится известное количество сурфактанта. Использование различных ПАВ позволяет варьировать поверхностную сдвиговую вязкость в диапазоне от 0.0001 до 0.1 гр/с.

Проведение экспериментального исследования, подтвердившего правильность выбора безразмерного параметра в задаче о натекании жидкости на плёнку сурфактанта, откроет путь для предсказания развития исследуемой неустойчивости в различных технологических конфигурациях многофазных систем и даст дополнительный инструмент воздействия на межфазный теплообмен.

### Список литературы

1. Mizev A., Shmyrova A. Effect of an insoluble surfactant film on the stability of the concentration-driven Marangoni flow // J. Fluid Dyn. 2014. Vol. 49. N. 1. P. 26–36.
2. Roché M., et.al. Marangoni flow of soluble amphiphiles // Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 112. P. 208302.
3. Shmyrova A., Shmyrov A. Instability of a homogeneous flow from a lumped source in the presence of special boundary conditions on a free surface // EPJ Web of Conferences. 2019. Vol. 213. P. 02074.
4. Шмырова А. И., Шмыров А. В. Механизмы формирования вихревых структур на границе раздела жидкость-газ в присутствии адсорбционного слоя. // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 3. С 31–38.
5. Mizev, A., Shmyrov, A., Shmyrova, A. On the shear-driven surfactant layer instability // Journal of Fluid Mechanics. 2022. Vol. 939. N. A24.

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРО И НАНО КАПЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КАПЛИ

Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н.

Кубанский госуниверситет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350065, Россия

Для нахождения равновесной формы, висющей/сидящей капли обладающей осевой симметрией в модели, предложенной Б.В. Дерягиным [1,2], учитывающей толщину промежуточного слоя между жидкостью и газом решается вариационная задача нахождения экстремума функционала полной энергии, содержащего элемент, соответствующий расклинивающей энергии, формирующей промежуточный слой. Для капли, поверхность которой является поверхностью вращения, определяемой образующей  $(x(s), y(s)), s \in [0, L]$ , элемент, соответствующий расклинивающей энергии [3-5], имеет вид:

$$E_{\text{раскл}}(S) = -\pi h_m \sigma_{LG} \int_0^L \dot{y} \arcsin \dot{x} ds,$$

где  $\dot{x} = dx/ds$ ,  $\dot{y} = dy/ds$ .

Первая вариация функционала потенциальной энергии капли в модели, предполагающей непрерывный переход от жидкой фазы к газообразной, определяет [6] разность давлений внутри  $P_1$  и  $P_2$  снаружи капли:

$$P_1 - P_2 = \sigma_{LG} (2H + h_m K),$$

где  $K$  – гауссова кривизна,  $H$  – средняя кривизна поверхности капли,  $h_m$  – толщина расклинивающего слоя поверхности капли,  $\sigma_{LG}$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Вариационная задача для функционала полной энергии капли объема  $V$  имеет решение при значении коэффициента Лагранжа:

$$\lambda = \frac{\sigma_{LG}}{Y_A^2} \left[ 2 \sin \theta_0 Y_A + h_m \cos^2 \theta_0 - \frac{1}{c\pi} V \right],$$

где  $\theta_0$  – угол смачивания, определяемый формулой Юнга [7,8],  $Y_A$  – радиус пятна прилипания капли,  $c$  – капиллярная постоянная.

Используя значение коэффициента Лагранжа, получили формулу высоты  $X_A$  капли:

$$X_A = \frac{2 \sin \theta_0 Y_A + h_m \cos^2 \theta_0 - \frac{1}{c\pi} V}{4 \left| \frac{Y_A^2}{2c} + 1 \right|}$$

что соответствует результату, полученному в работе [9] и опытам [10, 11] для микро капель на гидрофильной поверхности. Полученная формула для ка-

пель радиуса меньше  $2e^{-9}$  м и поверхностей с нулевым углом смачивания формула определяет высоту капли меньше толщины поверхностного слоя. Точность представления толщины плёнки может быть скорректирована учётом упругой энергии промежуточного слоя [3], [12] третьего порядка малости в разложении полной энергии капли по обезразмеренной ширине потенциальной ямы. Высота капли будет определяться в зависимости от упругости поверхностного слоя, энергия которого описывается функционалом Уилмора [13].

### Список литературы

1. Дерягин Б. Я., Обухов Е. В. Аномальные свойства тонких слоев жидкостей. — Коллоид журн., 1935, т. 1, № 5, с. 385 — 398.
2. Дерягин Б.В. Журнал физической химии: научный журнал. - Москва; Ленинград: Изд-во АН СССР, 1940. – Т. 14, вып. 2. - С. 137-280.
3. Щербаков Е.А., Щербаков М.Е. О равновесии подвесной капли с учетом изгибной жесткости промежуточного слоя // Докл. РАН. Физика, технические науки. 2012. Т. 53. 6. С. 243–244.
4. Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н. Энергия формирования промежуточного слоя. Ранжирование энергий капли // Материалы четвертой Междунар. науч. конф. «Осенние математически чтения в Адыгее». 2021. С. 299.
5. Щербаков М.Е. О союзном функционале гауссовой кривизны и равновесных формах жидких капель // Экологич. вестн. науч. центров Черноморского экономич. сотрудничества. 2019. № 1. С. 6–12.
6. Коровкин В.П., Секриеру Г.В., Сажин Ф.М. Анализ связи капиллярного и расклинивающего давления // Математические исследования (Кишинев). 1989. Т. 108. С. 27–32.
7. Young T. An Essay on the Cohesion of Fluids. Philosophical Transactions of the Royal Society. 1805. Vol. 95., P. 65.
8. Laplace P.S. Théorie de l'action capillaire. Supplément au dixième livre du traité de mécanique céleste. Paris. Courcier. 1806. С. 143.
9. Марков И. И., Батурин М. В., Иванов М. Н. и др. // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. 2009. № 2 (19). С. 51.
10. Padday J. F., Proc. of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1972. V. 330. Is. 1583. P. 561.
11. Марков И. И., Батурин М. В., Циклы природы и общества. Материалы V Международной конференции. Ч.2. Ставрополь, 1997. С. 94—97.
12. Keller J.B., Merchant G.J. Flexural Rigidity of a Liquid Surface, J. of Statistical. 1991. Vol. 63. №5/6. P. 1039–1051.
13. Финн Р. Равновесные капиллярные поверхности. Математическая теория. М. Мир. 1989. 310 с.

Яворский Н.И.

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

В работе рассматривается точное решение идеальной несжимаемой жидкости обтекающей два и более пузырей различного размера, движущихся с одинаковой скоростью и расположенных либо перпендикулярно скорости их движения, либо параллельно. Определена сила взаимодействия пузырей в зависимости от расстояния между ними. Показана деформация поверхности пузырей в зависимости от расстояния между пузырями и их размерами.

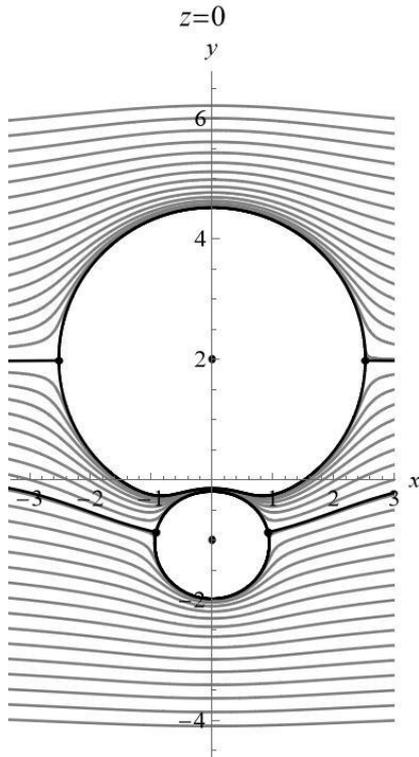


Рис. 1. Линии тока в плоскости симметрии двух пузырей и их деформация при сближении. Отношение радиусов пузырей 1:2,52.

Получено выражение для силы взаимодействия пузырей и их присоединённой массы, справедливое с хорошей точностью вплоть до малых расстояний между пузырями. В частности, асимптотическое выражение для силы притяжения двух одинаковых пузырей радиуса  $a$ , движущихся параллельно со скоростью  $V_0$  есть

$$F = \pi \rho V_0^2 a^2 \left[ -\frac{9}{5} (a/r)^4 - (a/r)^7 + O((a/r)^9) \right] \quad (1)$$

Здесь  $r$  – расстояние между центрами пузырей,  $\rho$  – плотность жидкости. Сравнение формулы (1) с численным расчётом, полученным путём интегрирования давления по поверхности пузыря, показано на рисунке 2. Точками показан численный расчёт, сплошной кривой обозначена асимптотическая зависимость.

В случае, когда пузыри движутся друг за другом возникает силы отталкивания между ними. Таким образом, максимальная силы притяжения соответ-

ствует рассмотренному случаю, когда пузыри движутся параллельно с одинаковой скоростью.

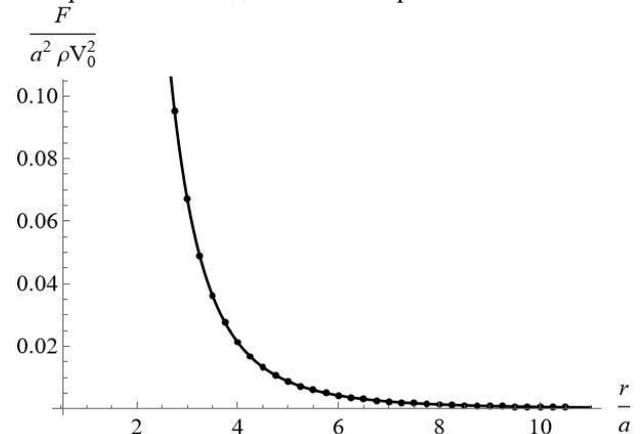


Рис. 2. Зависимость безразмерной силы притяжения двух одинаковых пузырей от величины безразмерного расстояния между ними.

Определено время коалесценции в зависимости от их размера, расстояния между пузырями и начальной скорости их сближения. Результаты показывают, что начальная скорость сближения пузырей может существенно уменьшать величину промежутка времени, через которое пузыри сближаются на расстояние двух безразмерных радиусов.

В случае, когда сила взаимодействия определяется (1), получено решение для времени за которое происходит коалесценция. Это решение выражается при помощи функции Аппеля (рис.3).

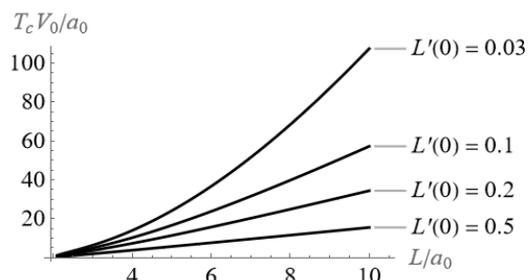


Рис.3. Зависимость безразмерного времени коалесценции от начального расстояния  $L$  и начальной скорости сближения пузырей  $L'(0)$ .

Рассмотрено уточнение формулы (1) учётом дальнейших членов разложения.

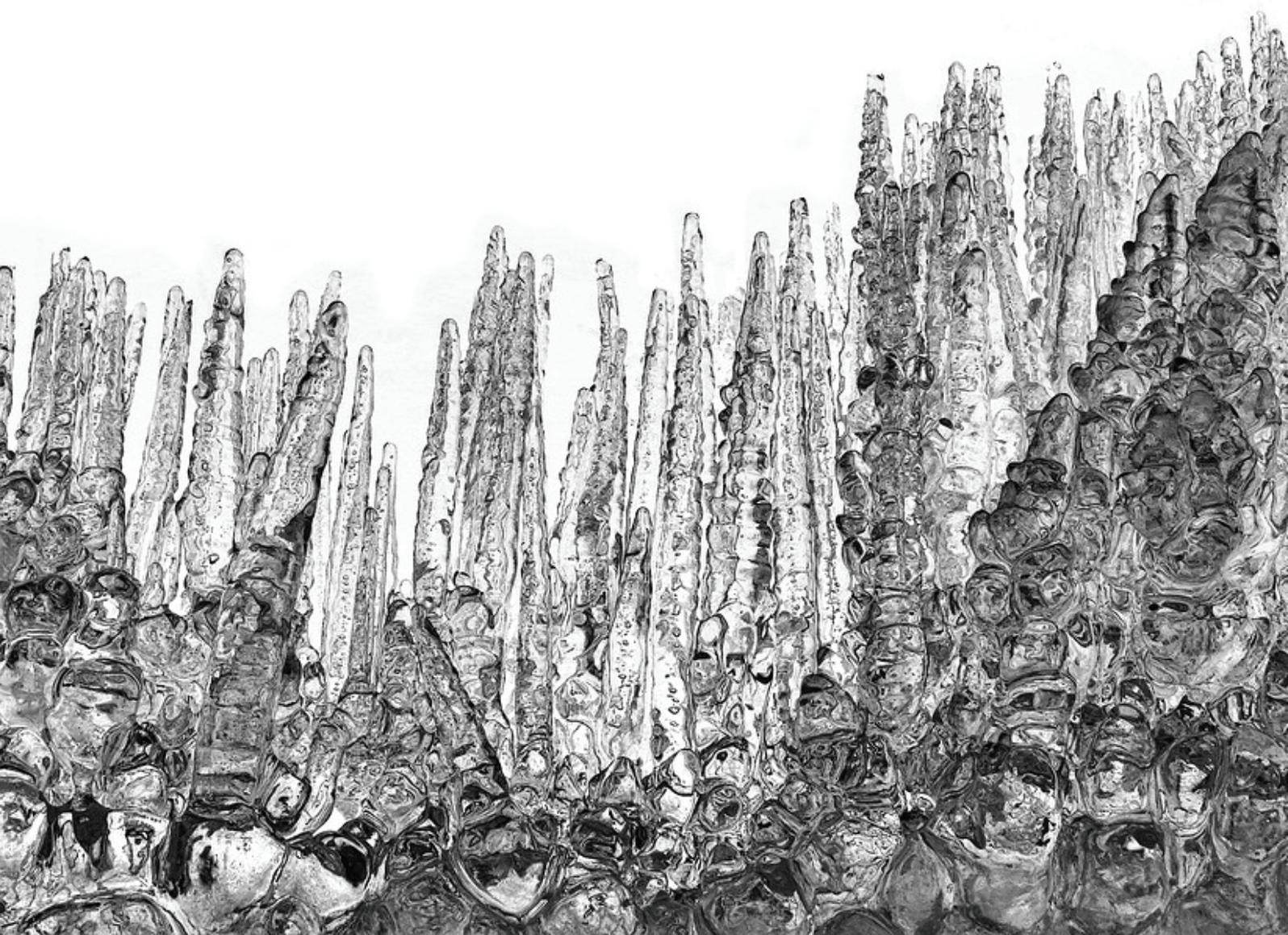
Работа имеет практические приложения для построения физических моделей описания динамики коалесценции в пузырьковых средах при высоких числах Рейнольдса движения пузырьков, а также для валидации численных алгоритмов, описывающих движение пузырьков.

Работа поддержана бюджетным проектом (№ FWNS-2021-0009).



# СЕКЦИЯ 3

## Фазовые переходы





Давыдов М.Н.<sup>1,2</sup>, Чернов А.А.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет

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

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

В докладе рассматривается задача о декомпрессии некоторого объема расплава газонасыщенной магмы, в процессе которого давление в расплаве монотонно падает с начального  $p_i$  до конечного  $p_f$  с постоянной скоростью  $q$ . По современным представлениям магма представляет собой гетерогенный расплав, состоящий из тугоплавких и легколетучих компонентов. В результате декомпрессии в объеме расплава зарождается и начинает расти газовый пузырек (или ансамбль газовых пузырьков). Таким образом поставленная задача разделяется на две части - нуклеацию пузырька и описание механизма его роста.

В рассматриваемом случае, когда декомпрессия осуществляется постепенно, зародыш образуется при достижении определенного пересыщения (при некотором давлении  $p_n$ ), которое, по большей части, зависит от скорости декомпрессии  $q$ . Это можно показать, если в уравнении для определения числа зародышей  $n_p$ , перейти от интегрирования по времени к интегрированию по давлению (для простоты будем считать, что среда однородна, а декомпрессия осуществляется равномерно по всему объему):

$$V_0 \int_0^{t_n} J dt = V_0 \int_{p_i}^{p_n} (J / q) dp = n_p,$$

здесь  $J$  - частота зародышеобразования, которая также зависит от текущего давления в среде. Из последнего соотношения видно, что чем больше скорость декомпрессии, тем при меньших давлениях (при больших пересыщениях) образуется зародыш.

Глубина достигаемых пересыщений зависит также от величины объема  $V_0$ , в котором ожидается нуклеация, выбор которого, надо сказать, достаточно произволен.

Отметим, что знание о том, в какой момент образуется пузырек, необходимо для моделирования дальнейшего его роста, так как условия, при которых он зарождается, являются начальными условиями в задаче о его росте. Необходимо отметить, что, конечно же, при декомпрессии в жидкости зарождается не один зародыш, а ансамбль зародышей, которые в процессе своего роста влияют друг на друга. Однако это влияние проявляется тогда, когда начинают взаимодействовать формирующиеся вокруг пузырьков диффузионные погранслои. Это происходит на стадии, когда объемная концентрация газовой фазы достаточно велика (что можно объяснить относительно малой толщиной диффузионных погранслоев).

Рост пузырька происходит как вследствие инерционных эффектов, так и в результате десорбции газа из окружающей его жидкости, что приводит к росту его массы. Данный процесс может быть условно разделён на три стадии. Первая из них, достаточно скоротечная, это динамическая инерционная. На данной стадии давление газа в пузырьке практически равно

начальному, а зависимость радиуса пузырька от времени имеет экспоненциальный характер. Следующая - переходная характеризуется выравниванием давления газа в пузырьке с давлением окружающей жидкости. На данной стадии вокруг пузырька формируется диффузионный погранслой, что приводит к десорбции газа на межфазной поверхности. Масса пузырька при этом начинает увеличиваться. После того, как давление газа в пузырьке практически выравнивается с давлением окружающей жидкости, начинается асимптотическая диффузионная стадия, на которой рост пузырька происходит исключительно в результате десорбции. На данной стадии, если давление в жидкости постоянно, зависимость радиуса пузырька от времени имеет корневой вид.

В результате авторами сформулирована математическая модель роста нуклеации и последующего роста газового пузырька в пересыщенной в результате быстрой декомпрессии жидкости (магматическом расплаве), учитывающая как динамические, так и диффузионные процессы.

В работе построено численное решение данной задачи и получены результаты для большого диапазона начальных и конечных давлений и скоростей декомпрессии. Численно исследована зависимость параметров возникающего пузырька от скорости декомпрессии.

Также найдено приближенное полуаналитическое решение задачи, построение которого основано на существовании квазистационарного состояния для процесса роста пузырька. Это позволило свести исходную краевую задачу с подвижной границей к обыкновенному дифференциальному уравнению на радиус пузырька. Полученное полуаналитическое решение справедливо в широком диапазоне достигаемых пересыщений и на всех стадиях процесса, включая переходную (от инерционной к диффузионной), в том числе для изменяющихся внешних условий.

Сравнение показало хорошее соответствие приближенного решения и численного, полученного по полной модели.

#### Список литературы

1. Chernov A.A., Kedrinsky V.K., Pil'nik A.A. Kinetics of gas bubble nucleation and growth in magmatic melt at its rapid decompression // *Physics of Fluids*. 2014. V. 26, № 11. P. 116602.
2. Chernov A.A., Pil'nik A.A., Davydov M.N., Ermanyuk E.V., Pakhomov M.A. Gas nucleus growth in high-viscosity liquid under strongly non-equilibrium conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 123. P. 1101-1108.
3. Чернов А.А., Давыдов М.Н., Пильник А.А. Динамика роста газового пузырька в высоковязкой газонасыщенной жидкости при ее декомпрессии с конечной скоростью // *Теплофизика и аэромеханика*, 2023, №1, с. 163-172.

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РОСТА ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Зорькина А.И.<sup>1,2</sup>, Роньшин Ф.В.<sup>1,2</sup>, Кабов О.А.<sup>1</sup>

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

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

Гравитация является важнейшим параметром, влияющим на процесс кипения. Отсутствие плавучести и естественной конвекции увеличивают отрывной диаметр пузырей и уменьшают частоту их отрыва, тем самым обеспечивая более высокое пространственное и временное разрешение задачи, позволяя детально изучить динамику пузыря и процессы теплопередачи при кипении. Эксперименты в условиях микрогравитации интересны не только с фундаментальной точки зрения, но и с практической, поскольку теплообменные системы с фазовыми переходами активно используются в космической промышленности.

Настоящий эксперимент проведен на Международной космической станции в период с 2019 по 2021 год [1]. Экспериментальная установка – ячейка, заполненная диэлектрической рабочей жидкостью FC-72, оборудована датчиками давления и микротермопарами, позволяет проводить эксперимент в строго контролируемых условиях. Джоулевый нагреватель – слой хрома толщиной 400 нм, напыленный на подложку из фторида бария толщиной 5 мм. Через время  $t_{\text{wait}}$  после включения нагрева лазерным импульсом инициализируется паровой пузырь в центре нагревателя – каверне, глубиной 200 мкм. Установлены скоростные инфракрасная с частотой 240 Гц, регистрирующая поле температур нагревателя снизу, и черно-белая с частотой 500 Гц, записывающая форму растущего пузыря сбоку, камеры. В настоящей работе исследуется рост парового пузыря при следующих параметрах эксперимента: давление жидкости  $p$  (500-1000 мбар), температура недогрева  $T_{\text{sub}}$  (1-5 °C), время ожидания  $t_{\text{wait}}$  (2-5 с), длительность лазерного импульса  $t = 20$  мс, плотность теплового потока с нагревателя  $q = 0,5$  Вт/см<sup>2</sup>. Обработка изображений с ИК камеры и данных с чёрно-белой произведена в программе Matlab. Контур пузыря аппроксимируется окружностью, поскольку без воздействия внешних сил, под действием сил поверхностного натяжения, пузырь имеет сферическую форму. Детальное описание установки и обработки экспериментальных данных приведено в [1, 2].

Диаметр пузыря аппроксимируется методом наименьших квадратов степенной зависимостью от времени. Для калибровки данных ИК камеры проведены численные исследования в программе COMSOL Multiphysics до момента образования пузыря, т. е. за время  $t_{\text{wait}}$ . Таким образом, с хорошей точностью определено поле температуры нагревателя. В настоящей работе исследуются зависимости диаметра и контактного угла пузыря от времени при различных параметрах эксперимента. Зависимости средней и минимальной, соответствующей области интенсив-

ного испарения, температур поверхности под пузырём, рассчитанные в области контактной линии. Определены тепловые потоки с поверхности нагрева (см. рис. 1). Экспериментальные зависимости сравниваются с корреляциями, представленными в литературе [3, 4].

$p = 500$  мбар;  $T_{\text{sub}} = 1$  °C;  $q = 0,5$  Вт/см<sup>2</sup>;  $t_{\text{wait}} = 2$  с

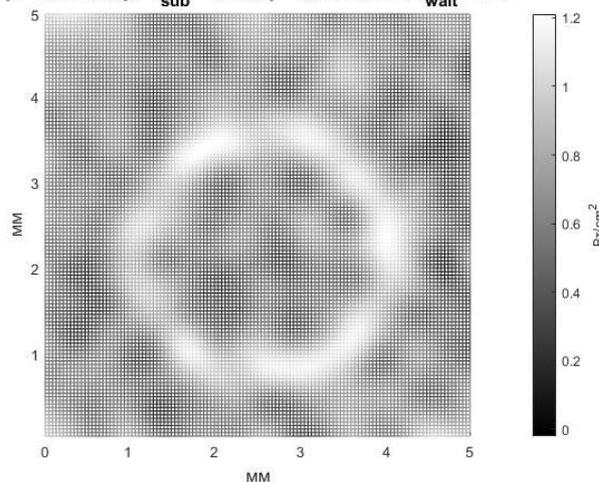


Рис. 1. Тепловой поток в момент времени  $t = 6$  s после инициализации пузыря

Скорость роста увеличивается с уменьшением давления, увеличением времени ожидания и уменьшением недогрева. Определено, что корреляция Ягова и Лабунцова [3] для диаметра пузыря хорошо согласуется с экспериментальными данными при эмпирически подобранных коэффициентах, отвечающих за испарение с межфазной границы и испарение микрослоя. Модель контактного угла [4] так же показывает хорошее соответствие с опытными данными.

### Список литературы

1. Sielaff A. et al. The multiscale boiling investigation on-board the International Space Station: An overview // Applied thermal engineering. – 2022. – С.
2. Oikonomidou O. et al. Bubble growth analysis during subcooled boiling experiments on-board the international space station: Benchmark image analysis // Advances in Colloid and Interface Science. – 2022. – С. 102751.
3. Лабунцов Д. А., Ягов В. В. Механика двухфазных систем. М.: МЭИ, 2000. 374 с.
4. Rednikov A. Y., and Colinet P. Asymptotic analysis of the contact-line microregion for a perfectly wetting volatile liquid in a pure-vapor atmosphere // Phys. Rev. Fluids – 2017. - 2 124006

Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 21-79-10357,  
<https://rscf.ru/project/21-79-10357/>

## ВЛИЯНИЕ МИКРОРАЗМЕРНЫХ ПУЗЫРЬКОВ ПАРА НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

Левин А.А., Хан П.В.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
ул. Лермонтова, 130, г. Иркутск, 664033, Россия

Изучение тепловых и гидродинамических аспектов кипения недогретой жидкости является актуальной задачей современной теплофизики. Увеличение возможностей инструментального анализа, расширение подходов к математическому моделированию, рост вычислительных мощностей используемых для реализации предсказательных моделей, а также углубление представлений о механизмах передачи тепла и др. способствуют разработке новых инженерных решений и обеспечению безаварийной работы оборудования, в технологической основе которого лежит использование преимуществ, связанных с фазовым превращением рабочего тела. Наиболее сложным случаем для изучения с каждой – теоретической, экспериментальной или вычислительной стороны, является нестационарный теплообмен. Отдельной проблемой поиска обобщений в такой сложно формализуемой задаче является недостаток эмпирических сведений, так как большая часть существующих экспериментальных результатов получена в условиях стационарных тепловых потоков, температур, либо на идеализированных поверхностях. Обобщение таких данных, полученных для узких диапазонов граничных условий, приводит к появлению замыкающих соотношений для предсказательных моделей, не предназначенных для использования при описании аварийных режимов эксплуатации оборудования [1]. В связи с этим особый интерес вызывает проведение исследований на поверхностях, приближенных к реальным техническим приложениям, с изменяющимися граничными условиями

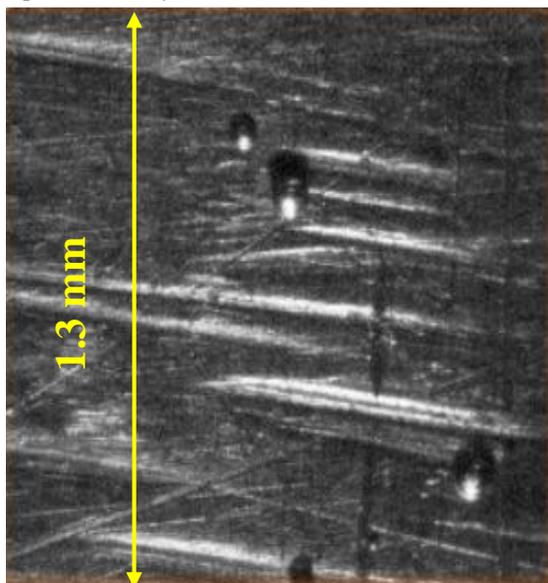


Рис. 1. Участок поверхности нагревателя, с образовавшимися в ходе эксперимента паровыми пузырьками в результате импульсного тепловыделения.

В представленном докладе будут рассмотрены результаты экспериментального изучения нестационарного вскипания потока недогретой воды. Эксперименты проводились на вертикальном прозрачном рабочем участке с нагревателем, насосом, конденсатором, дегазационным баком и устройствами, автоматически контролирующими условия эксперимента (давление, расход и температуру). Нагреватель представляет собой вертикальную полую цилиндрическую трубу из нержавеющей стали 321 с наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 1 мм. Шероховатость поверхности измеряли с помощью щупа TR200. Средняя шероховатость поверхности ( $R_a$ ) составляла около 0,9 мкм, а максимальная шероховатость ( $R_{max}$ ) — 4 мкм. Испытательный участок был оборудован датчиками для измерения температуры, напряжения и давления. Мощность нагрева создавалась за счёт пропускания через нагреватель трёхфазного выпрямленного электрического тока. Были использованы следующие режимные условия: начальное давление близко к атмосферному, скорость роста температуры теплоотдающей поверхности варьировалась от 0,4 до 15 К/мс, скорость потока жидкости 0,4 м/с. Для изучения вопроса влияния микропузырьков на теплообмен использовалась высокоскоростная камера Phantom V2012, с разрешающей способностью 5 мкм на пиксель и частотой съемки до 600 кадров в микросекунду. Результаты видеонаблюдений были обработаны, выделены характеристики паровых включений (пузырьков, агломераций и др.), а также проведена классификация образующихся пузырьков по их взаимодействию с поверхностью и соседними центрами нуклеации. Результаты наблюдений были использованы в разработанную авторами модификацию пристенной модели теплообмена RPI [2], основанную на покомпонентном учёте теплового потока, связанного с различными механизмами передачи теплоты в системе нагреватель-пузырь-жидкость, с учётом существенной нестационарности рассматриваемого процесса.

### Список литературы

1. Levin, A., Khan, P. Characteristics of nucleate boiling under conditions of pulsed heat release at the heater surface // Applied Thermal Engineering. 2019. 149, с. 1215-1222
2. N. Kurul, M.Z. Podowski, On the modeling of multidimensional effects in boiling channels, in: Proceedings of the 27th national heat transfer conference, 1991, 301–314.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-29-00628).

## ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТЕЙ НА ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ МЕТАЛЛОВ И КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Орлова Е.Г., Слюсарский К.В., Дорожкин А.В.

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

Испарение капель жидкостей реализуется во многих технологических процессах, в том числе в системах спрейного охлаждения. Известно [1], что спрейное (капельное) охлаждение является наиболее эффективным среди систем, базирующихся на двухфазных технологиях охлаждения, позволяет равномерно охлаждать теплонагруженную поверхность. В условиях подвода теплоты от теплонагруженной поверхности к расположенной на ней капле в зависимости от температуры поверхности реализуется один из четырех режимов фазового перехода [2]: испарение, пузырьковое кипение, переходный режим от пузырькового кипения к плёночному, плёночный режим. Эффективным режимом фазового перехода является пузырьковое кипение. Плёночный режим является опасным из-за формирования паровой подушки между охлаждающей жидкостью и теплонагруженной поверхностью. Паровая подушка характеризуется высоким термическим сопротивлением, её формирование приводит к перегреву и к дальнейшему разрушению охлаждаемого оборудования. Целью настоящей работы является исследование возможности сдвига кризиса теплообмена (перехода к плёночному режиму) в область более высоких температур за счёт формирования текстуры на поверхностях материалов лазерным излучением.

Текстуры формировались иттербиевым наносекундным импульсным волоконным лазером IPG-Photonics с длиной волны 1064 нм в воздушной среде на поверхностях металлов (нержавеющая сталь, алюминий-титановый сплав) и карбидокремниевой керамики SiC. Кризис теплообмена исследовался на установке, состоящей из нагревательного элемента и системы для реализации теневого оптического метода. Капля дистиллированной воды помещалась дозатором на разогретую поверхность образца. Температуры под поверхностью образца и на поверхности регистрировались термопарами. Полученные теневые изображения обрабатывались в программном обеспечении: определялись геометрические размеры капли, время испарения.

Модифицированные лазерным излучением поверхности образцов исследовались микроскопическим и профилометрическим методами. Полученная текстура характеризовалась группой трёхмерных параметров шероховатости: среднее арифметическое высоты ( $S_a$ ) характеризует среднюю шероховатость поверхности; эксцесс ( $S_{ku}$ ) характеризует форму выступов (плосковершинность); приращение относительной площади ( $S_{dr}$ ) характеризует прирост площади поверхности за счёт шероховатости относи-

тельно молекулярно-гладкой поверхности; плотность выступов ( $S_{pd}$ ) характеризует число выступов на единице площади поверхности.

Перед проведением экспериментов по исследованию кризиса теплообмена определялись свойства смачивания образцов с использованием теневого метода. Капля воды объёмом 10 мкл размещалась на поверхности образца. С использованием источника света и фотокамеры получены теневые изображения капли [3], которые обрабатывались в программном обеспечении Drop Shape Analysis. Определялись геометрические характеристики капель. Погрешность не превышала 5%.

Установлено, что модификация поверхностей SiC наносекундным лазерным излучением позволяет сдвинуть кризис теплообмена (реализацию эффекта Лейденфроста) на 50 К в область более высоких температур. На поверхностях металлов создавались текстуры: в виде микроканалов, соприкасающихся кратеров, микростолбиков, анизотропная текстура в виде «цветной капусты». Последняя обеспечила наибольший сдвиг возникновения кризиса теплообмена (более 110 К на поверхности алюминиевого сплава и более 40 К на поверхности нержавеющей стали).

Экспериментально установлено, что отсутствует явная связь температуры Лейденфроста со следующими характеристиками текстуры: средней шероховатостью, высотой между впадинами и вершинами, а также приростом площади поверхности за счёт шероховатости. Также установлено, что температура Лейденфроста смещается в область более высоких температур при уменьшении островершинности выступов и росте их плотности на единице площади поверхности.

### Список литературы

1. Gao X., Li R. Spray impingement cooling: The state of the art. In: Murshed, S. M. S., editor. *Advanced Cooling Technologies and Applications* [Internet]. London: IntechOpen; 2018 [cited 2023 May 10].
2. Bernardin J. D., Mudawar I. The leidenfrost point: Experimental study and assessment of existing models // *J. Heat Transfer*. 1999. V. 121. P. 894–903.
3. Feoktistov D.V., Kuznetsov G.V., Sivkov A.A., Ivashutenko A.A., Nikitin D.S., Shanenkov I.I., Abdelmagid A.M., and Orlova E.G. Expanding the scope of SiC ceramics through its surface modification by different methods // *Surf. Coat. Technol.* 2022. V. 435. 128263.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-73-10245, <https://rscf.ru/project/21-73-10245/>).*

Роньшин Ф.В.<sup>1</sup>, Зорькина А.И.<sup>1</sup>, Редников А.<sup>2</sup>, Тадрист Л.<sup>3</sup>, Кабов О.А.<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Université libre de Bruxelles, TIPs, CP 165/67,

av. F.D. Roosevelt, 50, Brussels, 1050, Belgium

<sup>3</sup> Aix-Marseille Université, Laboratoire IUSTI,

rue Enrico Fermi, 5, Marseille, 13453, France

Кипение является сложным процессом, используемым в различных областях, включая энергетику, химическую промышленность и космическую индустрию. Основной целью данного исследования является изучение механизмов теплопередачи, возникающих при кипении в условиях микрогравитации. Для решения этой задачи была разработана программа исследований кипения в условиях микрогравитации при поддержке Европейского космического агентства [1]. Эксперимент RUBI (Reference mUltiscale Boiling Investigation) направлен на исследование динамики роста и теплообмена в области контактной линии одиночного парового пузыря. Подробное описание экспериментальной установки представлено в [2]. Исследование проводится на тонкоплёночном нагревателе с использованием скоростной визуализации и термографии. Инициация процесса кипения производится через локальный перегрев искусственного места зародышеобразования с помощью сфокусированного лазерного пятна. Установка оснащена системой терморегулирования, обеспечивающей нагрев рабочей жидкости FC-72 в диапазоне от 30 до 70°C.

Диаметр пузырей измерялся во времени при помощи разработанного автоматизированного алгоритма [3]. Разработана численная модель, описывающая процесс роста одиночного парового пузыря. На рисунке (сверху) представлена зависимость эквивалентного диаметра от времени. Выделено три характерных стадии роста пузыря. Нулевая - инерциальная стадия роста пузыря, которая в данном эксперименте не исследовалась в силу недостаточного временного разрешения (500 Гц). Первая - не имеет сферическую форму (деформирован) из-за быстрого роста под воздействием лазерного импульса. Наблюдаются колебания формы пузыря. Температура поверхности падает вследствие диссипации энергии лазерного импульса. Вторая - пузырь приобретает сферическую форму. Температура поверхности близка к постоянной за счёт диссипации энергии лазерного импульса и действия Джоулева нагрева (показатель степени 0.5, соответствует тепловой стадии роста). Третья - плавный рост пузыря при росте температуры поверхности под воздействием нагрева, показатель степени роста увеличивается. На рисунке снизу представлена зависимость температуры в области контактной линии (микрослоя) и характерные величины контактного угла. Значение контактного угла в данном случае связано с интенсивностью испарения. Исследовано влияние недогрева, давления и времени ожидания на динамику роста пузыря. Изучено влияние

растворённых инертных газов на процесс роста отдельных паровых пузырьков.

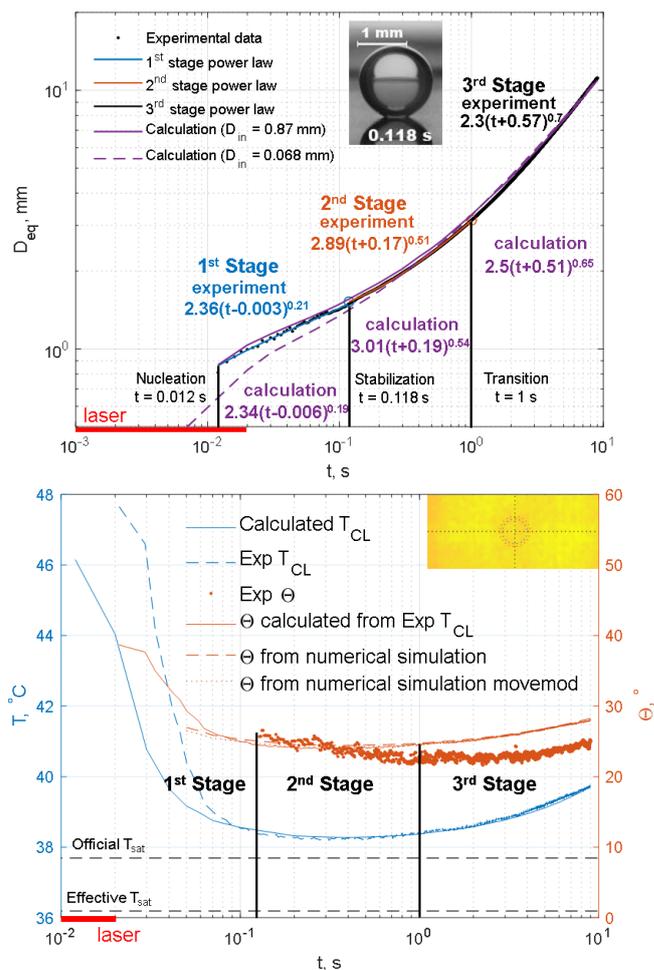


Рис. 1. Зависимость эквивалентного диаметра (сверху), температуры поверхности вблизи контактной линии и контактного угла (снизу) от времени при  $P = 500$  мбар;  $\Delta T_{sub} = 1^\circ\text{C}$ ;  $q = 0.5 \text{ Bm/cm}^2$ ;  $t_{wait} = 2 \text{ с}$ .

#### Список литературы

1. ESR AO-2004-111: BOILING, AO-1999-110: EVAPORATION, AO-2004-096: CONDENSATION.
2. Sielaff, A., Mangini, D., Kabov, O., Raza, M. Q., Garivalis, A. I., Zupančič, M., ... & Tadrist, L. (2022). The multiscale boiling investigation on-board the International Space Station: An overview. Applied thermal engineering, 117932.
3. Oikonomidou, O., Evgenidis, S., Argyropoulos, C., Zabulis, X., Karamaounas, P., Raza, M. Q., ... & Karapantsios, T. (2022). Bubble growth analysis during subcooled boiling experiments on-board the international space station: Benchmark image analysis. Advances in Colloid and Interface Science, 102751.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10357, <https://rscf.ru/project/21-79-10357/>

**ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНОЙ И ДИСПЕРСНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА РЕАЛИЗАЦИЮ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ БИНАРНЫХ ЖИДКОСТЕЙ****Феоктистов Д.В., Лага Е.Ю., Лавриненко С.В.**Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск, 634050, Россия

При зажигании и горении капель топлив, широко используемых на практике, реализуется достаточно хорошо изученный процесс фазового перехода в режимах испарения или кипения горючей жидкости. Зажигание и горение многокомпонентных топлив при определенных условиях происходит в условиях диспергирования капель (вторичного распыления капель). Последнее известно под терминами паффинг и микровзрыв. Суть этих процессов состоит во вторичном распылении жидких топлив, способствующем увеличению в несколько раз площади испарения компонентов и размеров области их выгорания, что значительно интенсифицирует процессы зажигания и горения, а также увеличивает полноту выгорания топлива.

Анализ публикаций, посвящённых диспергированию топлив, показал, что его интенсивность зависит от большого числа факторов, таких как способ подвода теплоты (кондуктивный, конвективный, радиационный), температура греющей среды, концентрация компонентов в составе топлив, суспензий, эмульсий, растворов, свойства компонентов и их соотношение в смеси (твёрдые частицы, горючая жидкость, вода, поверхностно-активные вещества), размеры капель, условия их формирования, определяющие как структуру капли (горючая жидкость является оболочкой, вода центром, и наоборот), так и расположение капли в пространстве (сидячая на поверхности, на подвеске, летящая в потоке газа). В реальных условиях, на характеристики диспергирования многокомпонентных топлив оказывает влияние совокупность перечисленных выше факторов. Поэтому при изменении условий зажигания и горения таких топлив, отдельные факторы из выше перечисленных при их совокупном влиянии на процесс диспергирования, могут оказывать как положительный эффект, так и ослаблять его влияние.

Известные результаты позволяют установить механизм диспергирования, который в обобщённой форме сводится к разрушению паровых пузырей, но не позволяют определить причины, особенности и масштабы протекания этого эффекта при зажигании и горении топливных смесей. Также стоит отметить, что компонентная база исследованных топлив достаточно ограничена и представлена в основном углями (каменные, бурые), горючими жидкостями (керосин, мазут, различные виды масел) и одной негорючей жидкостью (водой), которые являются самостоятельными технологическими энергоресурсами, широко используемыми на практике. Не разработаны основные положения теории, применимые на практике для прогнозирования гарантированного протекания диспергирования капель, в том числе перспективных теплоносителей для охлаждения оборудования, выделяющего тепловые потоки высокой плотности.

В докладе будет доказываться сформулированная гипотеза, объясняющая причину реализации паффинга и микровзрыва капель в условиях высокотемпературного нагрева, достаточного для стабильного зажигания многокомпонентных топлив. Гипотеза основана на предположении о том, что главным фактором, влияющим на инициацию диспергирования (паффинга или микровзрыва) в условиях высокотемпературного нагрева многокомпонентных капель является взаимная растворимость/нерастворимость компонентов. Оценка растворимости многокомпонентных составов выполнена на основе широко известного подхода «подобное растворяет подобное». Последний базируется на сопоставлении дисперсной и полярной составляющих поверхностного натяжения компонентов, входящих в состав топлив. Поверхностное натяжение связано с энергией взаимодействия молекул в объеме конденсированной фазы, мерой которой является энергия адгезии. Работа адгезии – это работа, которую нужно совершить в изотермических условиях для разделения молекул конденсированной фазы, т.е. разрыва межфазной поверхности компонентов, входящих в состав многокомпонентной смеси. Слабые связи (ван-дер-ваальсовых взаимодействий) характеризуются дисперсной составляющей. Полярная составляющая поверхностного натяжения характеризует сильные связи между молекулами (водородные, ионные, ковалентные, диполь-дипольные). Практически все известные исследования по паффингу и микровзрыву проводятся на смесях, в состав которых входит вода, являющаяся наиболее распространенным сильно полярным веществом. Как правило, вода смешивается с углеродосодержащими горючими компонентами, которые являются неполярными (дисперсными) веществами. При смешении полярного вещества с неполярным согласно подходу «подобное растворяет подобное» образуется смесь с взаимонерастворимыми компонентами. При нагревании малых объемов жидкостей (капель) этих смесей до высоких температур происходит диспергирование (вторичное распыление). Т.е. паффинг или микровзрыв реализуются только при интенсивном высокотемпературном нагреве многокомпонентной капли при достижении изотермических условий на межфазной поверхности компонентов при условии, что в поверхностном натяжении одного компонента преобладает полярная составляющая (жидкость должна быть сильно полярной), а в поверхностном натяжении другого компонента преобладает дисперсная составляющая (жидкость должна быть сильно дисперсной).

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-29-00417,  
<https://rscf.ru/project/23-29-00417>).*

Хан П.В., Левин А.А.

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

Использование низких температур потока существенно повышает эффективность теплообмена как в конвективном режиме, так и при пузырьковом кипении. Процессы образования паровых пузырьков, их характеристики, взаимодействие и роль в теплообмене существенно меняются с ростом недогрева потока. Быстро растущая температура теплоотдающей поверхности создает нестационарные условия кипения и делает непригодными большую часть имеющихся теоретических моделей. В исследовании таких сложных режимов кипения большую роль играет видеосъёмка с высоким пространственным и временным разрешением и численное моделирование.

На данный момент большая часть исследований, посвящённых динамике роста пузырьков, сосредоточена на изучении изолированных одиночных пузырьков. Гилман [1] уточнил существующую модель раздельных тепловых потоков (RPI), учитывая, в том числе, уменьшение числа пузырьков и изменение их размеров на счёт их слияния, которое рассматривал как случайный процесс. Джуд и Чопра [2] со ссылкой на ряд предшественников и результаты собственных экспериментов показывают, что при определенных условиях пузырьки могут подавлять или наоборот активировать соседние центры нуклеации. Вадламуди и др. [3] в новейшем экспериментальном исследовании показали, что вновь появившийся пузырёк может существенно сократить время роста ранее существовавшего пузырька за счёт гидродинамического воздействия на его микрослой, осуществляемого без прямого контакта.

В данном докладе представлены результаты экспериментального исследования доли взаимодействующих пузырьков и оценка их вклада в теплоотдачу на основе RPI модели в условиях быстрого роста температуры нагревателя (3000-3500 К/с) в широком диапазоне недогревов потока от 23 до 103 К.

В рабочем участке поток недогретой воды проходит в восходящем направлении со средней скоростью 0.52 м/с через канал поперечным размером 18 мм и длиной 210 мм, в центре которого располагается цилиндрический стальной нагреватель с внешним диаметром 12 мм и толщиной 1 мм. Видеосъёмка осуществляется через прозрачную вставку во внешней стенке канала высокоскоростной камерой Phantom V2012. Частота съёмки составила 180 000 кадров в секунду при пространственном разрешении 5.5 микрон/пикс. Скорость роста температуры металла измерена при помощи термопар, приваренных с внутренней стороны нагревателя. Из видеоклипов получена информация о времени появления, времени роста, времени жизни и максимальном диаметре каждого пузырька. Фиксировался характер взаимодействия пузырька с соседними центрами нуклеации, что позволило разделить пузырьки на одиночные и кластерные. При малых недогревах отмечено существо-

вание пульсирующих пузырьков, которые циклически меняют свой размер, избегая отрыва, конденсации и повторного образования зародыша, что определяет их пониженный вклад в теплопередачу. Проведены расчёты тепловых потоков по исходной и модифицированной RPI модели, учитывающей отличия в характеристиках трех типов пузырьков (Рис. 1).

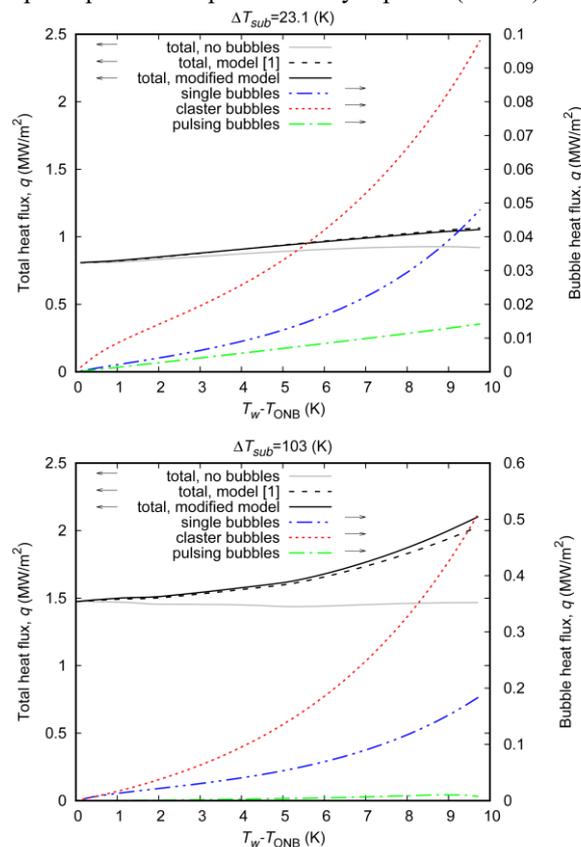


Рис. 1. Сравнение расчётных тепловых потоков для пузырьков разных типов, а также суммарного теплового потока по исходной и модифицированной модели при различных значениях недогрева потока.

#### Список литературы

1. Gilman L., Baglietto E. A self-consistent, physics-based boiling heat transfer modeling framework for use in computational fluid dynamics // Int. J. Multiph. Flow. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 95. P. 35–53.
2. Judd R.L., Chopra A. Interaction of the nucleation processes occurring at adjacent nucleation sites // J. Heat Transfer. 1993. Vol. 115, № 4. P. 955–962.
3. Vadlamudi S.R.G., Moiz M., Srivastava A. Microlayer dynamics of hydrodynamically interacting vapour bubbles in flow boiling // J. Fluid Mech. 2023. Vol. 958. P. 1–22.

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

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

Чернов А.А.<sup>1,2</sup>, Давыдов М.Н.<sup>1,3</sup>

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

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

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

Уже несколько десятилетий большое внимание исследователей привлекает проблема вулканических извержений. Прежде всего, это связано с необходимостью прогноза и определения степени потенциальной опасности действующих вулканов. Очевидно, что даже непрерывное наблюдение за активным вулканом не может, в силу отсутствия прямых методов наблюдения за процессами, происходящими в земной коре, дать достаточно полной информации о том, что происходит в канале вулкана при извержении. Кроме того, современными методами диагностики начало самого извержения может быть предсказано только по косвенным признакам. Можно лишь с уверенностью говорить о происходящих в магме фазовых переходах по конечным образцам затвердевшей магмы и о характере разрушения изначально сплошного магматического потока по структуре выброса. Поэтому последовательное и как можно более строгое построение математических моделей течения магмы в канале вулкана, а также исследование динамики различных режимов вулканических извержений методами механики многофазных сред с целью понимания механизмов, определяющих тип и характер извержения и интерпретации данных полевых наблюдений, представляется особенно актуальным.

В теоретических и экспериментальных постановках по моделированию вулканических извержений прежде всего следует обратить внимание на следующие вопросы: особенность формирования трёхфазного состояния магмы при её декомпрессии; эволюцию структуры магмы при её подъеме по кондуиту; динамику разрушения вспененной и частично закристилизованной магмы - процесс фрагментации с образованием газовзвеси и магматических "бомб"; влияние реологии магмы на структуру потока и динамику извержения в целом. Надо отметить, что все эти задачи чрезвычайно сложны как для экспериментального, так и для теоретического исследования, и каждая из них представляет отдельную проблему.

На данный момент времени существует множество работ, посвящённых экспериментальному и математическому моделированию вулканических извержений как в общей постановке, так и сопровождающих это явление отдельных процессов. Ключевым из них здесь является процесс кавитации магмы при её декомпрессии, во многом предопределяющий структуру формирующегося двухфазного потока. Несмотря на то, что вопросы, посвящённые кавитации обычных жидкостей достаточно хорошо проработаны, процесс кавитации магматических расплавов всё же имеет свою специфику. Это, прежде всего, связано с уникальными физико-химическими свойствами

магм. Среди них, прежде всего, следует отметить их высокую вязкость, которая в процессе дегазации может меняться на порядки, что накладывает определенные ограничения на применимость тех или иных, как правило, равновесных моделей. В частности, из-за высокой вязкости магмы время релаксации давления в пузырьке может при определенных условиях составлять сотни секунд, а следовательно, инерционные эффекты при описании динамики роста пузырька должны быть учтены. Теоретическому моделированию нуклеации и роста как одиночного пузырька, так и ансамбля пузырьков в широком диапазоне пересыщений как в случае мгновенной декомпрессии, так и в случае декомпрессии с конечной скоростью, посвящены работы авторов [1-3].

И все же, несмотря на то, что данной проблеме в литературе уделено должное внимание, один эффект, который может оказывать существенное влияние на общую картину всего процесса, до сих пор не учитывался. Этот эффект связан с наличием бародиффузии, обусловленной формированием в расплаве в процессе роста пузырька большого градиента давления. Исследованию данного эффекта и посвящена настоящая работа. Предложена математическая модель процесса, представляющая собой совместные динамическую и диффузионную задачи. Показано, что по мере роста пузырька вокруг него формируется диффузионный погранслои, ведущий к появлению в расплаве большого градиента вязкости и, как следствие, большого градиента давления. Найдено полуаналитическое решение задачи, основанное на существовании квазистационарного состояния для процесса роста пузырька. Показано, что эффект бародиффузии существенен на начальной и переходной стадиях процесса. Со временем его влияние убывает и на диффузионной стадии полностью исчезает.

### Список литературы

1. Chernov A.A., Kedrinsky V.K., Pil'nik A.A. Kinetics of gas bubble nucleation and growth in magmatic melt at its rapid decompression // *Phys. Fluids*. 2014. V. 26, N 11. P. 116602.
2. Chernov A.A., Pil'nik A.A., Davydov M.N., Ermanyuk E.V., Pakhomov M.A. Gas nucleus growth in high-viscosity liquid under strongly non-equilibrium conditions // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. V. 123. P. 1101-1108.
3. Чернов А.А., Давыдов М.Н. Динамика роста газового пузырька в высоковязкой газонасыщенной жидкости при ее декомпрессии с конечной скоростью // *ТИА*. 2023. Т. 30, N 1. С. 163-172.

*Работа поддержана РНФ  
(грант № 22-19-00092).*

## СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА ТРЁХЭЛЕКТРОДНЫМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Эмиров Р.М., Гаджимагомедов С.Х., Алиханов Н.М.-Р., Рабаданов М.Х.

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет»  
ул. М. Гаджиева, д. 43-а, Махачкала, 367000, Россия

Магнитные наночастицы обладают уникальными электромагнитными свойствами, которые делают их полезными во многих областях, включая медицину, энергетику, электронику, катализ и очистка окружающей среды [1]. Существует различные методы синтеза магнитных наночастиц, включая электрохимическое получение, химический осаждение, гидротермальный синтез и механическое измельчение [2].

Синтез нанопорошка магнетита проводился электрохимическим трехэлектродным методом в один этап по методике [3]. Суть способа заключалась в анодном растворении железа в растворе хлорида натрия. При этом происходит окисление промежуточных продуктов электрохимического процесса с последующим образованием наночастиц магнетита.

На рисунке 1 представлена микрофотография синтезированного магнетита трёхэлектродным электрохимическим методом. Из фотографии видно, что образец представляет собой порошок состоящий из агломератов нанокристаллитов магнетита.

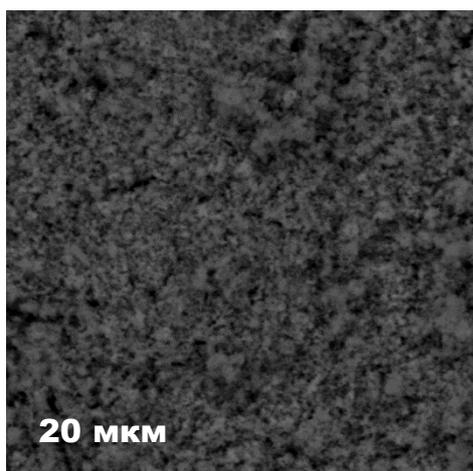


Рис. 1. Морфология магнитного нанопорошка полученного трёхэлектродным электрохимическим методом.

В работе исследованы структурные и текстурные характеристики магнитных наночастиц, полученных электрохимическим методом в трёхэлектродной ячейке.

На Рисунке 2 показано сравнение дифрактограммы, полученного магнетита и карточки 98-008-2234 из базы данных PAN- ICSD. Структурно-фазовый анализ показал наличие, в полученном порошке, кубической фазы магнетита ( $Fe_3O_4$ ) (пространственная группа  $Fd-3m$ ) с параметрами ячейки  $a=8.4050\text{\AA}$ . Средний размер кристаллитов, вычисленный по формуле Шеррера, равен примерно 25 нм.

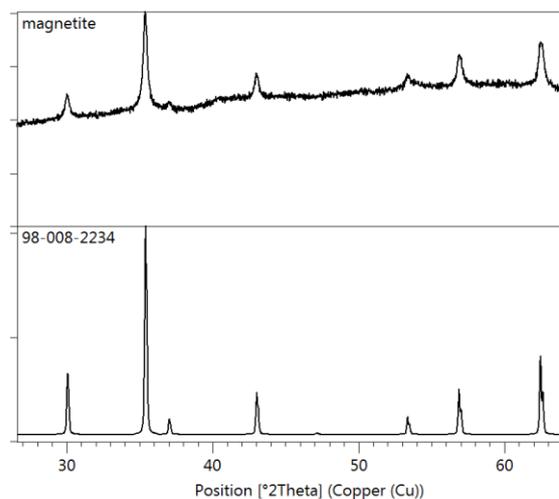


Рис 2. Дифрактограмма магнитного нанопорошка полученного трёхэлектродным электрохимическим методом.

Методом низкотемпературной адсорбции – десорбции азота определены текстурные характеристики магнетита. Полученный нанопорошок имеет удельную поверхность  $19,5\text{ м}^2/\text{г}$ , что во много раз больше, чем у природного магнетита -  $1,78\text{ м}^2/\text{г}$  [4].

Таблица 1. Текстурные характеристики магнетита.

Текстурные характеристики	Значение
Величина удельной поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$	19,5
Удельный объем монослоя, НТД/г	4,48
Константа БЭТ	37
Удельная поверхность мезопор $\text{м}^2/\text{г}$	36,0

### Список литературы

- Shukla S., Khan R., Daverey A. Synthesis and characterization of magnetic nanoparticles, and their applications in wastewater treatment: A review //Environmental Technology & Innovation. – 2021. – Т. 24. – С. 101924
- Koo K. N. et al. Preparation and characterization of superparamagnetic magnetite ( $Fe_3O_4$ ) nanoparticles: A short review //Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences. – 2019. – Т. 15. – №. 1. – С. 23-31.
- Эмиров Р.М., Рабаданов М.Х. Технология получения нанопорошков магнетита // Тез. докл. Межд. н.-практ. конференции и школы молодых ученых «Химия, химические технологии и экология: наука, производство, образование». Махачкала, 2018. - С.132.
- Мартемьянов Д. В., Галанов А. И., Юрмазова Т. А. Определение сорбционных характеристик различных минералов при извлечении ионов  $As^{5+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Ni^{2+}$  из водных сред //Фундаментальные исследования. – 2013. – №. 8-3. – С. 666-670.

Работа выполнена в рамках гранта  
Главы Республики Дагестан 2022 г





## СЕКЦИЯ 4

# Научные основы нефтегазовых технологий





**МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ АВТОГРП  
В ПОРОУПРУГОЙ СРЕДЕ**Байкин А.Н.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск

e-mail: alexey.baykin@gmail.com

В нефтегазовой отрасли одним из основных инструментов повышения нефтеотдачи является создание системы поддержания пластового давления (ППД) за счёт заводнения. Для этого часть добывающих скважин по определённой схеме переводят в нагнетание воды, которая вытесняет нефть к добывающим скважинам. Одним из возможных последствий применения данной технологии является самопроизвольное возникновение техногенной трещины гидроразрыва пласта (трещины автоГРП) на нагнетательной скважине, когда давление на забое скважины превышает давление инициации трещины гидроразрыва пласта (ГРП). Некоторые промысловые исследования показывают, что в окрестности соседних скважин трещины автоГРП способны отклоняться от направления максимальных горизонтальных напряжений в пласте. Данное обстоятельство может привести к преждевременному обводнению добывающих скважин, находящихся на криволинейном пути распространения трещины. Поэтому необходимо понимать, при каких условиях трещина способна изменять траекторию своего развития.

Трещины автоГРП имеют схожую природу с обычными трещинами ГРП: распространение трещины происходит под действием давления закачиваемой жидкости. Отличием автоГРП является то, что закачка низковязкой жидкости происходит с достаточно низким расходом в течение длительного промежутка времени. За это время в окрестности трещины автоГРП успевают сформироваться обширная зона повышенного давления. Взаимодействие фронтов фильтрации от соседних скважин и от трещины автоГРП генерирует существенно неоднородное поле давления. Это приводит к возникновению объёмной силы пропорциональной градиенту давления, которая действует на упругий скелет породы и способна изменять напряжённо-деформированное состояние вблизи трещины авто-ГРП. Таким образом, формируется дополнительное сжимающее напряжения на стенках трещины («обратное напряжение» [1]), а также возможна локальная переориентация максимальных главных напряжений.

В данной работе для моделирования криволинейного развития трещины автоГРП предложена модель, основанная на уравнениях пороупругости Био [2], использованных для описания механики пласта. Задача решается в двумерной постановке в условиях плоской деформации. Развитие трещины определяет-

ся законом сохранения массы в приближении теории смазки с утечками в пласт, рассчитываемыми из уравнения фильтрации. В качестве условия распространения трещины используется критерий Ирвина, а направление роста трещины выбирается ортогональным локальному максимальному растягивающему напряжению.

Поставленная задача решается расширенным методом конечных элементов (XFEM) [3]. Специальными функциями, учитывающими локальную особенность в виде трещины, обогащаются как неизвестные перемещения, так и давление. Трещина представляется в виде ломаной линии, проходящей сквозь двумерную расчётную сетку независимо от нее. На трещине вводится отдельная одномерная сетка, которая позволяет дискретизовать закон сохранения массы и сопрячь его естественным образом с аппроксимацией уравнений Био в единой слабой постановке. Для проверки условий распространения трещины рассчитываются коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) на основе вычисления интеграла взаимодействия.

Представленный численный алгоритм был верифицирован на известных решениях задачи ГРП из литературы. Отдельно проведена тщательная проверка реализации расширенного метода конечных элементов, вычисления коэффициентов интенсивности напряжений в случае статических трещин в упругой среде.

В результате численных экспериментов была исследована возможность поворота трещины автоГРП в окрестности добывающих и нагнетательных скважин, а также показано влияние эффекта пороупругости на криволинейное развитие трещины автоГРП.

**Список литературы**

1. Golovin S.V., Baykin A. N. Influence of pore pressure on the development of a hydraulic fracture in poroelastic medium // Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2018, V. 108, P. 198–208.
2. Coussy O. Poromechanics // Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004, 298p.
3. Khoei A. R. Extended Finite Element Method: Theory and Applications // Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2015, 565p.

*Работа поддержана стипендией Президента РФ (грант № СП-1703.2022.1) и Научно-техническим центром Газпромнефти.*

## МОДЕЛЬ АВТОГРП С УЧЁТОМ ЭФФЕКТА ПОРОУПРУГОСТИ И УПРОЩЁННОЙ МЕХАНИКОЙ ТРЕЩИНЫ

Дмитрачков Д.К.<sup>1,2</sup>, Байкин А.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет

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

Одним из основных методов повышения нефтеотдачи является технология заводнения, когда часть скважин переводят в режим нагнетания жидкости, вытесняющей нефть к добывающим скважинам. На практике при характерных темпах закачки есть риск превысить критическое давление инициации трещины гидроразрыва пласта (ГРП), в результате чего может образоваться техногенная трещина гидроразрыва пласта (трещина автоГРП). Относительно медленная закачка в течение длительного времени приводит к тому, что трещины автоГРП распространяются на километры и влияют на характер заводнения и эффективность системы разработки. Такие трещины могут привести к преждевременному обводнению добывающих скважин, а также служить причиной непроизводительной закачки.

Задача распространения трещин автоГРП включает в себя несколько физических процессов: течение низковязкой жидкости в узкой трещине, пороупругую реакцию среды и её разрушение под действием давления закачиваемой жидкости, фильтрацию жидкости в пласт в масштабах сектора разработки. Процесс протекает длительное время, поэтому необходимо учитывать влияние окружающих скважин на картину фильтрации в окрестности трещины. На сегодняшний день существует множество моделей ГРП, которые учитывают множество физических эффектов, возникающих в задаче ГРП, однако они сложны и требуют больших вычислительных мощностей, что затрудняет их применение при моделировании трещин автоГРП в инженерной практике. В связи с этим появилась тенденция к разработке более простых и вычислительно эффективных математических моделей, которые были бы способны улавливать основную физику, характерную для задачи автоГРП.

Для описания развития трещины автоГРП в данной работе предложена упрощённая модель, основанная на уравнениях пороупругости Био [1] на масштабе сектора разработки. В предположении, что деформации не оказывают влияния на процесс фильтрации, уравнение на давление можно отделить от уравнений равновесия. Течение несжимаемой жидкости внутри трещины описывается законом сохранения объёма в предположении о равномерном распределении давления в трещине. Это позволяет упро-

стить механику трещины и использовать энергетический критерий распространения, эффективно учитывающий влияние вязкости жидкости и утечек жидкости в пласт [2]. Отличительной особенностью модели является возможность учёта сложной картины фильтрации в пласте в сочетании с вычислительно эффективным расчётом дополнительного сжимающего напряжения, возникающего за счёт влияния порового давления. Также утечки в пласт рассматриваются естественным образом из решения уравнения фильтрации без использования упрощённых аппроксимаций, таких как закон Картера.

Численное решение задачи осуществляется комбинацией метода конечных объёмов для моделирования сопряжённого течения в пласте и трещине и аппарата функций Грина для расчёта пороупругих напряжений. Метод конечных объёмов обеспечивает консервативность численной схемы, что является важным фактором в решении задач ГРП. С использованием функций Грина расчёт пороупругих напряжений происходит полуаналитически, что обеспечивает высокую скорость вычислений.

Алгоритм верифицирован в сравнении с известным численным решением, полученным с помощью более полного симулятора [3], а также определены границы применимости модели. Предложенная модель использована для исследования влияния неоднородности порового давления, активности окружающих скважин и пороупругих эффектов на распространение трещины автоГРП. Работа выполнялась при поддержке Научно-технического центра Газпромнефти.

### Список литературы

1. Coussy O. Poromechanics // Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004, 298p.
2. Dontsov E. et al. Ultrafast Hydraulic Fracturing Model for Optimizing Cube Development // SPE/AAPG/SEG Unc. Res. Tech. Conference, Denver, Colorado, USA, July 2019.
3. Golovin S.V., Baykin A.N. Influence of pore pressure on the development of a hydraulic fracture in poroelastic medium // Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2018, V. 108, P. 198–208.

*Работа поддержана стипендией Президента РФ (грант № СП-1703.2022.1).*

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ НАНОМАТЕРИАЛОВ В БУРОВОЙ РАСТВОР НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАНСПОРТА ШЛАМА ИЗ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ

Жигарев В.А.<sup>1</sup>, Гузей Д.В.<sup>1,2</sup>, Лысакова Е.И.<sup>1</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

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

В настоящее время исследованием применения нанофлюидных технологий в различных направлениях нефтегазового дела занимаются десятки групп в разных странах мира (в первую очередь в США, Китае, Индии, Южной Корее, Германии и т.д.). Тем не менее, применение нанофлюидов в задачах бурения, в силу чрезвычайной сложности явлений, всё ещё изучено слабо. Во многих случаях отсутствуют систематические экспериментальные данные и понимание механизмов влияния наночастиц на рассматриваемые процессы. Наножидкости стали использоваться для управления реологическими свойствами и контроля процесса фильтрации бурового раствора, для снижения коэффициента трения буровой трубы и стенок скважины и предотвращения таких явлений, как прихват буровой колонны. В ряде работ показано, что благодаря добавке наночастиц можно значительно улучшить свойства буровых растворов [1].

Для оценки эффективности добавки применения наночастиц в буровые растворы на углеводородной основе проведены лабораторные исследования и получены экспериментальные данные об эффективной вязкости и реологии, разработанных буровых растворов, модифицированных углеродными нанотрубками.

После получения данных о реологических характеристиках растворов проведена серия расчётов для исследования транспорта шлама в модельной скважине.

Базовый буровой раствор на углеводородной (УВ) основе представляет собой обратную эмульсию. В качестве углеводородной основы растворов использованы следующие компоненты: низковязкое базовое масло «REBASE» PC-230 (ООО «НПО «РЕАСИБ», г. Томск) марки В1. Соотношение углеводородной фазы и воды, равное 65/35. Для стабилизации эмульсии использовался неионогенный эмульгатор «REBASE» PC-510, предназначенный для создания обратных эмульсий. Концентрация частиц в растворах варьировалась от 0.1 до 0,5 мас. %.

Для моделирования выноса шлама из скважины использовался подход гранулированной среды. В расчёте рассматривалось турбулентное течение бурового раствора. Для моделирования турбулентности использовалась двухпараметрическая  $k-\omega$  SST модель. Более подробно расчётная модель транспорта шлама в кольцевом канале представлена в работах [2-4].

Расчётная область представляет собой кольцевой канал, образованный двумя гладкими прямыми трубами круглого сечения. Диаметр внутренней трубы равен  $D_1=0,110$  м, диаметр внешней трубы равен  $D_2=0,2207$  м. Скорость вращения буровой трубы варьировалась 40 об/мин, расход бурового раствора 10 кг/с. Плотность бурового раствора была равна 968 кг/м<sup>3</sup>. Реология буровых растворов задавалась из экспериментальных данных. Для моделирования использовалась реологическая модель Хершеля - Балкли как наиболее общая. На поверхностях труб выполняются условия прилипания.

Было показано, что коэффициент эффективности выноса шлама для УВ раствора с добавкой углеродных нанотрубок оказывает весомое влияние на коэффициент эффективности выноса шлама, так добавка 0,5 мас. % наночастиц повышает эффективность выноса шлама на 40%. Такое влияние добавок наночастиц на эффективность выноса шлама вызвано уменьшением разницы в скоростях несущего бурового раствора и частиц. Показано, что добавка нанотрубок приводит к значительному изменению картины течения бурового раствора, и как следствие, изменению режимов транспорта шлама. С увеличением концентрации МУНТ в буровом растворе распределение осевой скорости дисперсной фазы и дисперсионной среды становится более однородным по сечению кольцевого зазора.

### Список литературы

1. Наножидкости и «умные жидкости» в технологиях разработки нефтегазовых месторождений / И.Н. Евдокимов; М. ООО «Издательский дом Недра», 2016. 247 с.
2. Zhigarev V.A., Minakov A.V., Neverov A.L. and Pryazhnikov M.I. Numerical study of the cuttings transport by drilling mud in horizontal directional well // J. Phys.: Conf. Ser. 2019, 1382 P.1-6.
3. Minakov A.V., Zhigarev V.A., Mikhienkova E.I., Neverov A.L., Buryukin F.A., Guzei D.V. The effect of nanoparticles additives in the drilling fluid on pressure loss and cutting transport efficiency in the vertical boreholes // J. Pet. Sci. Eng. 2018. V. 171. P. 1149–1158.
4. Minakov A. V., Mikhienkova E.I., Neverov A.L., Rudyak V.Ya. Comprehensive numerical study of the effect of nanoparticle additives on the cutting transport performance in horizontal boreholes // J. Comput. Des. Eng. 2021, V. 8 (1) P. 283–297.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Российского научного фонда в рамках проекта  
№ 23-79-30022 <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОВЫТЭСНЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕФТИ НАНОСУСПЕНЗИЯМИ

Жигарев В.А.<sup>1</sup>, Гузей Д.В.<sup>1,2</sup>, Прыжников А.И.<sup>1</sup>, Скоробогатова А.Д.<sup>1</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

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

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Эффективность извлечения нефти из нефтеносных пластов современными, промышленно освоенными методами разработки во всех нефтедобывающих странах на сегодняшний день считается неудовлетворительной. Средняя конечная нефтеотдача пластов по различным странам и регионам составляет от 25 до 40%.

Остаточные, или неизвлекаемые промышленно освоенными методами разработки запасы нефти достигают в среднем 55-75% от первоначальных геологических запасов нефти в недрах.

Поэтому актуальными являются задачи применения новых технологий нефтедобычи, позволяющих значительно увеличить нефтеотдачу уже разрабатываемых пластов, на которых традиционными методами извлечь значительные остаточные запасы нефти уже невозможно. Одним из методов повышения нефтеотдачи является химический метод, это вытеснение нефти водными растворами ПАВ (включая пенные системы) или, вытеснение нефти растворами полимеров. Одной из причин, по которой в методах увеличения нефтеотдачи пластов используют ПАВ, является изменение смачиваемости породы, способствующее вымыванию из породы плёночной и капиллярно-удержанной нефти. В последние годы было проведено достаточно большое количество лабораторных экспериментов, подтвердивших высокую эффективность наночастиц в снижении краевого угла на поверхности различных материалов[1-2].

Целью данного исследования было определение эффективности довытеснения нефти из керна после базового агента вытеснения при использовании наносупензий.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования процессов довытеснения нефти из модельного керна. В качестве модельного керна-коллектора использовался песчаник Clear Amherst Gray – это осадочная порода, зерна которой преимущественно состоят из кварца, удерживаемого вместе кремнезёмом. Образцы керна были со следующими фильтрационно-ёмкостными характеристиками: проницаемость 50 мД и значение пористости 22%. Проведено исследование процесса довытеснения нефти с помощью заводнения суспензиями наночастиц оксида кремния. В качестве агентов довытеснения использовались растворы наносупензий с различной концентрацией и размером частиц. Ис-

следования проводились на средневязкой нефти (80 мПа×с.). Концентрация наночастиц в растворах варьировалась от 0,01 до 0,25 масс.%, а их размер – от 10 до 35 нм.

В ходе проведённых экспериментов были получены зависимости величины перепада давления и проницаемости образцов керна от порового объёма прокачиваемой жидкости. Данные параметры определялись при насыщении нефтью и при дальнейшей последовательной закачке вытесняющих агентов. Вытесняющие агенты закачивались в следующем порядке: вода, наносупензия, вода.

Проведены фильтрационные эксперименты по исследованию процессов довытеснения нефти из образцов керна после вытеснения нефти базовым агентом вытеснения (дистиллированной водой). Проведённые фильтрационные эксперименты позволили установить зависимость коэффициента вытеснения от размера наночастиц. Было показано, что при одной концентрации наночастиц коэффициент вытеснения нефти при довытеснении с помощью наносупензий возрастает с уменьшением размера наночастиц. Такое поведение обусловлено зависимостью коэффициента межфазного натяжения на границе нефть/наносупензия и краевого угла смачивания в точке контакта нефть/горная порода/наносупензия от размера наночастиц. Показано что с уменьшением размера наночастиц прирост коэффициента вытеснения возрастает. Так для наносупензий с размером наночастиц 10 нм прирост коэффициента вытеснения возрастает на 10 %. Для наносупензии с размером частиц 35 нм прирост коэффициента вытеснения нефти составил 3,6%.

### Список литературы

1. Bera A., Belhaj H. Application of nanotechnology by means of nanoparticles and nanodispersions in oil// J. Nat. Gas Sci. Eng. 2016. V.34, P.1284–1309.
2. Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Suleymana Y.N. Meshkova V.D., Guzey D.V. Experimental study of nanoparticle size and material effect on the oil wettability characteristics of various rock types // J. Mol. Liq., V. 327, P. 1-10.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRZ-2020-0012).*

**ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА УГЛЕВОДОРОДНОЙ СМЕСИ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРЯМОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ****Имомназаров Б.Х.<sup>1,2</sup>, Байкин А.Н.<sup>1,2</sup>, Старовойтова Б.Н.<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

Газоконденсат представляет собой углеводородную смесь, которая включает в себя компоненты в газообразной и жидкой фазах. Эта смесь часто образуется в естественных условиях при высоком давлении и температуре, присущих глубинным залежам углеводородов. При добыче часть газа переходит в жидкую фазу, образуя конденсат.

На этапе разведки на газоконденсатных месторождениях проводятся промышленные исследования, которые представляют собой комплекс работ, направленных на оценку объёма газоконденсата в пласте и анализ его характеристик. Важными элементами этих исследований являются определение конденсатогазового фактора (КГФ) [1], рассчитываемого как отношение дебита конденсата к дебиту газа, и анализ компонентного состава углеводородов. Эта информация впоследствии используется для планирования и развертывания соответствующей инфраструктуры для добычи газоконденсата.

Типичным методом анализа на газоконденсатной скважине является проведение замеров КГФ на различных режимах с разной депрессией. Однако этот процесс может представлять определённые сложности на низкопроницаемых коллекторах, так как переход скважины на стационарный режим может занять значительное время. С течением времени компонентный состав добытого газоконденсата может подвергаться изменениям. Это означает, что анализ проб, проведенный на этапе разведки, может не полностью отражать состав газоконденсата в дальнейшем. Это важный аспект, который должен быть учтён при планировании и проведении исследований на газоконденсатных месторождениях.

В данной работе предлагается оценивать компонентный состав на основе математического моделирования нестационарной многофазной фильтрации в пласте. Основная задача — подобрать начальное со-

держание углеводородных компонент в пласте таким образом, чтобы рассчитанные зависимости дебита и КГФ от времени максимально совпадали с измеренными на скважине. Благодаря нестационарности математической модели это можно сделать, не дожидаясь стационарного режима. Подбор параметров проводится с использованием специальных методов оптимизации, реализованных в пакете `ruSWarms` на языке Python. В качестве решения для прямой задачи используется композиционная модель многофазной фильтрации в случае вертикальной скважины с закреплённой трещиной ГРП при условии равновесного процесса конденсации или газообразования для углеводородных компонент. Для численного решения задачи фильтрации используется гидродинамический симулятор `tNavigator` [2].

Решение полученной обратной задачи было проверифицировано с помощью использования некоторого зашумленного решения прямой задачи при известном компонентном составе в качестве эталонных данных добычи. Построенная оптимизационная процедура применялась для исследования численной корректности обратной задачи по нахождению компонентного состава, а также проведение анализа чувствительности решения при внесении неопределённости в неварьируемые параметры задачи.

**Список литературы**

1. F. Fevang and C.H. Whitson: "Modeling Gas Condensate Well Deliverability" // Paper SPE 30714 presented at SPE, 1996. P. 221-230
2. Эйдинов Д.А. `tNavigator` — гидродинамический симулятор нового поколения // НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ XXI ВЕК, 2015. С. 62-69

*Работа выполнялась при поддержке  
Научно-технического центра Газпромнефти.*

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

Кармушин С.Р.<sup>1,2</sup>

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

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

Одной из характерных особенностей движения вязкоупругих сред, привлекающих внимание исследователей, является неустойчивость потока при определённых параметрах течения, приводящая к проявлению эффекта сдвигового расслоения (shear banding). Этот эффект заключается в возникновении конечного числа однонаправленных слоёв, на границе которых скорость сдвига терпит разрыв. Такое явление проявляется в широком классе течений и характеризуется резким уменьшением сопротивления потока при транспортировке вязкоупругих жидкостей в каналах и трубах.

В работе [1] эффект сдвигового расслоения описывается на основе нелинейной модели Джонсона — Сигалмана — Олдройда для несжимаемой вязкоупругой жидкости. Она объединяет в себе модель Джонсона — Сигалмана с несколькими временами релаксации и подход с введением искусственной ньютоновской вязкости в законе сохранения импульса. Ключевая особенность этой модели — существование стационарных решений с немотонной зависимостью напряжения сдвига от скорости сдвига. Такое поведение является неустойчивым, что приводит к образованию разрывов скорости сдвига при превышении ею некоторого критического значения. В работе [2] эффект сдвигового расслоения в течении Куэтта описывается в рамках модели Джонсона — Сигалмана с двумя временами релаксации, которая в отсутствие ньютоновской вязкости является гиперболической в классе одномерных течений. Отмечено явление гистерезиса в течении Куэтта, состоящее в зависимости структуры сдвиговых слоёв стационарного решения от предыстории его формирования.

В данной работе были получены законы сохранения для модели Джонсона — Сигалмана в случае

произвольного числа времён релаксации. Численная модель [2] провалидирована путем сравнения с экспериментальными результатами, приведенными в работах [3] и [4]. Выполнено обобщение численной модели для описания одномерных нестационарных течений между параллельными пластинами или в трубе под действием градиента давления (течение Пуазейля). На основе серии расчётов нестационарных течений продемонстрировано возникновение эффекта сдвигового расслоения при увеличении средней скорости потока. Исследована структура стационарных решений со сдвиговым расслоением, получаемых как численный предел нестационарных решений. Выведен алгоритм отбора стационарного решения, асимптотически реализующегося в нестационарном расчёте при заданном градиенте давления. Построены диаграммы зависимости напряжения сдвига на стенке канала от скорости для стационарных течений Куэтта и Пуазейля. Исследовано явление гистерезиса в течении Пуазейля.

### Список литературы

1. Malkus D. S., Nohel J. A., Plohr B. J. Analysis of new phenomena in shear flow of non-Newtonian fluids // *SIAM Journal on Applied Mathematics*. – 1991. – V. 51. – N. 4. – P. 899-929.
2. Ляпидевский В. Ю. Течение Куэтта вязкоупругой среды максвелловского типа с двумя временами релаксации // *Труды Математического института имени В.А. Стеклова*. – 2018. – Т. 300. – С. 146-157.
3. Salmon J. B. et al. Velocity profiles in shear-banding wormlike micelles // *Physical review letters*. – 2003. – V. 90. – N. 22. – P. 228303.
4. Salipante P. F., Little C. A. E., Hudson S. D. Jetting of a shear banding fluid in rectangular ducts // *Physical review fluids*. – 2017. – V. 2. – N. 3. – P. 033302.

## ПРОЯВЛЕНИЕ АНОМАЛЬНОГО СНИЖЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КАРБОНАТНЫЙ КОЛЛЕКТОР

Кравченко М.Н.<sup>1,2</sup>, Лесина Н.В.<sup>1</sup>, Аминев Д.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,  
пр. Ленинский 65, Москва, 1119991, Россия

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

Особенностью разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами (ТРИЗ) является слабая применимость для их разработки стандартных методов увеличения нефтеотдачи (МУН), что обусловлено низкой пористостью и проницаемостью коллектора, высокой вязкостью тяжёлой нефти, приводящих к низкому коэффициенту извлечения нефти. Для повышения подвижности нефти используются комплексные термохимические методы, сочетающие закачку растворителей с тепловыми обработками, в том числе в циклическом режиме. Эффективность пароциклических обработок (ПЦО) зависит от строения коллектора: для терригенных коллекторов эффективность значительно выше, чем для карбонатных. Как описано в работе [1] 6 из 7-х проведенных с 2019 по 2022 г. промысловых экспериментов ПЦО на карбонатах Самарской области не только не привели к повышению нефтеотдачи, а дебит снизился ниже исходного. Проведение лабораторных экспериментов на кернах является актуальной задачей в плане выявления особенностей протекания гидродинамических и тепловых процессов в пластах, содержащих кальциты в составе минеральной матрицы скелета.

В данной работе дан анализ результатов экспериментов на кернах карбонатных пластов высоковязкой нефти Самарской области, проведенных ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг" совместно с ЦНТ добычи углеводородов "Сколково", подтвердивших рост проницаемости при температурах закачиваемого пара в интервале 26-90 град. С и показавших резкое снижение проницаемости при дальнейшем повышении температуры [1]. При этом вязкость нефти монотонно снижалась фактически на 2 порядка. Эксперименты на двух различных кернах карбонатных пластов проводились в несколько этапов. Изначально для экстрагированных образцов определялись фильтрационно-ёмкостные свойства, затем образцы насыщались нефтью вязкостью 334 мПа\*с. Несколько серий экспериментов по нагнетанию горячего пара различной температуры с измерением относительных фазовых проницаемостей (ОФП) показали, что до температуры 90 град. С ОФП штатно повышались. При дальнейшем росте температуры наблюдалась немонотонность изменения кривых ОФП как по нефти, так и воде (Рис.1), что первоначально объяснялось тепловым расширением пористой матрицы и возможным процессом крекинга при высоких температурах минералов матрицы с выпадением нерастворимых солей. Однако гидродинамические расчёты [2], основанные на экспериментах по гидротермальному воздействию, показали, что тепловое расширение матрицы незначительно в связи с ростом давления во внутривыводном пространстве, а реализация второго фактора возможна при температурах свыше 300 гра-

дусов. Дополнительные эксперименты по акватермализу нефти [1] подтвердили гипотезу выпадения осадка смолисто-асфальтеновых фракций, но не за счёт распада минералов матрицы, а при изменении структуры самой нефти с выделением в отдельную подвижную фазу лёгких фракций и осаждении тяжёлой неподвижной нефтяной фазы. Подобное явление не учитывается в рамках классической теории, заложенной в промысловых симуляторах, где в качестве уравнений движения применяются линейные или степенные модели фильтрации. В этом случае требуется подход к описанию движения по модели тексотропной жидкости [3], учитывающей изменение структуры флюида, что не только позволяет объяснить причины аномального снижения проницаемости с ростом температуры выше определенного уровня, но и учесть фактор образования и роста карбонатных отложений в порах, обнаруженный с помощью сканирующей электронной микроскопии [1].

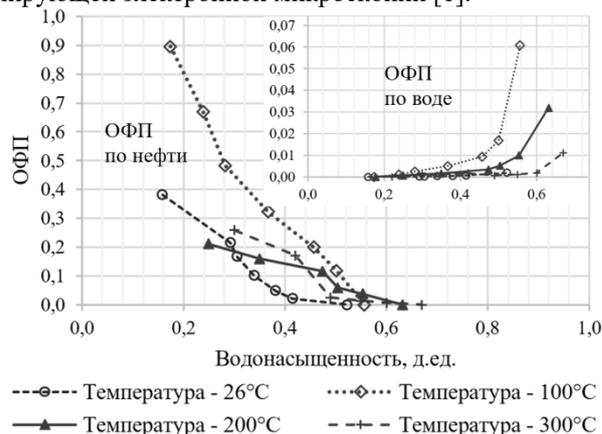


Рис. 1. Относительные фазовые проницаемости по нефти и воде при различных температурах

### Список литературы

1. Лесина Н.В., Николаева С.Н., Карамов Н.В. и др. Определение причин снижения проницаемости карбонатных коллекторов высоковязкой нефти при увеличении температуры на основе результатов лабораторных исследований // Геология, геофизика и РНИГМ разработка нефтяных и газовых месторождений. 2023. №5(377). С. 55-61.
2. Кравченко М.Н., Диева Н.Н., Фатыхов Г.А. Учет термодинамических особенностей генерации углеводородов из матрицы коллектора при гидротермовоздействии. Сборник тезисов V Всерос. науч. конф. «ТФГ» Ялта. Крым. 2020. Изд-во: Инст-т теплофизики СО РАН. С.71
3. Кравченко М.Н., Аминев Д.А. Изменение характера нелинейности закона фильтрации с учетом структурной перестройки флюида // Естественные и технические науки. 2022. №7 (170). С.23-28.

Работа частично поддержана РНФ  
(грант № № 22-77-10081).

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРО- И НАНОФЛЮИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЗАДАЧАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Минаков А.В.<sup>1,2</sup>, Гузей Д.В.<sup>1,2</sup>, Пряжников А.И.<sup>1</sup>, Якимов А.С.<sup>1</sup>, Жигарев В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет

пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

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

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Одной из важнейших отраслей экономики является нефтегазовая индустрия. Её устойчивое развитие требует, с одной стороны, разведки новых месторождений, а с другой, рационального освоения уже существующих. В частности, требуется создание новых технологий увеличения нефтеотдачи уже разрабатываемых пластов, освоение ранее использовавшихся и законсервированных месторождений. Одним из возможных и перспективных способов решения этих проблем является использование нанотехнологий в широком смысле. Применение микро- и нанотехнологий в задачах разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений призвано повысить эффективность существующих технологий добычи углеводородного сырья. Сложившиеся экономическая ситуация требуют создания принципиально новых высокоэффективных технологий разработки месторождений углеводородов, позволяющих повысить рентабельность добычи в условиях жесточайших санкций. Одним из возможных и перспективных способов решения этих задач может стать использование отечественных микро- и нанотехнологий. В настоящий момент в задачах нефтегазовой отрасли наночастицы используются в качестве добавок в буровые растворы для регулирования их реологических свойств, и контроля процесса фильтрации бурового раствора, снижения трения и предотвращения прихвата буровой колонны в процессе бурения; сейчас в задачах повышения нефтеотдачи (МУН) активно исследуется применение наносупернатентов (или наножидкостей) [1], также наносензоров применяются для регулирования смачиваемости [2]; еще одним из направлений использования наночастиц в процессах гидроразрыва пласта (ГРП), добавка наночастиц в жидкости ГРП не только приводит к закупориванию субмикронных пор, но и приводит к формированию на поверхности породы плохо проницаемой фильтрационной корки [3]. В результате исследований было показано, что в ряде случаев добавка наночастиц в жидкости ГРП может приводить к снижению фильтрационных потерь в несколько раз по сравнению с добавкой обычных мирокольматантов. При этом применение добавок наночастиц для этих целей считается наиболее целесообразным для низкопроницаемых сланцевых пород с размерами пор от 10 нм до 1000 нм [4].

Использование микрофлюидных технологий в задачах нефтегазовой отрасли включают в себя создание и применение микрочипов для изучения нефтевытеснения. Изготовление микрофлюидных чипов состоит из двух этапов: формирование канализированной поверхности на пластине и закупорка канализи-

рованной поверхности другой пластиной с целью создать закрытую капиллярную сеть, имеющую интерфейсы для подачи и отведения жидкостей, а также для подключения интегрированных модулей. Традиционным способом изучения методов увеличения нефтеотдачи является лабораторное заводнение образцов керн горных пород, которое даёт информацию о кинетике и количестве извлечённой нефти. Однако этот способ имеет ряд недостатков: сложность и длительность проведения испытаний; отсутствие наблюдения за механизмом и явлениями, происходящими на микроуровне пор; воспроизводимость результатов. Для изучения методов увеличения нефтеотдачи стали активно применяться микрофлюидные чипы, модели пористых сред, имитирующих горные породы. Проведена разработка экспериментальных микромасштабных моделей для изучения фильтрационных процессов при вытеснении нефти. Микромасштабные модели пористых сред разработаны на основе микрофлюидных чипов. Для изготовления микромасштабных моделей микрофлюидных чипов была выбрана технология «лаборатория-на-чипе». Эта технология позволяет изготавливать микрочипы послойно: на поверхности пластины из какого-либо материала формируется заглаблённый узор, который запечатывается ровной поверхностью другой пластины, образуя капиллярную сеть на стыке между пластинами. Проведённые отладочные эксперименты показали, что разработанная технология изготовления микрофлюидных чипов позволяет в течение длительного времени проводить повторяемые эксперименты с прокачиванием углеводородных жидкостей.

### Список литературы

1. AfzaliTabar M., Rashidi A., Alaei M., Koolivand H., Pourhashem S., Askari S. Hybrid of quantum dots for interfacial tension reduction and reservoir alteration wettability for enhanced oil recovery (EOR)// J. Mol. Liq.2020. V.307, P.1–14.
2. Киреев В. Нанотехнологии: история возникновения и развития// Нанотехнологии. 2008. № 2. С. 2-10.
3. Fakoya M. F.,Shah S. N. Enhancement of Filtration Properties in Surfactant-Based and Polymeric Fluids by Nanoparticles Hybrid of quantum dots for interfacial tension reduction and reservoir alteration wettability for enhanced oil recovery (EOR) // SPE 2014. SPE-171029-MS
4. Barati R. Application of nanoparticles as fluid loss control additives for hydraulic fracturing of tight and ultra-tight hydrocarbon-bearing formations// J. Nat. Gas Sci. Eng. 2015. V.27 № 3, P.1321–1327.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Российского научного фонда в рамках проекта  
№ 23-79-30022 <https://rscf.ru/project/23-79-30022/>*

## МИКРОФЛЮИДНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ИЗ МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПОВ ИМИТИРУЮЩИХ ПОРИСТУЮ СРЕДУ

Пряжников А.И., Якимов А.С., Пряжников М.И., Минаков А.В.

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

Существующие методы лабораторных исследований не соответствуют современным требованиям нефтяной индустрии. Часто они имеют высокую стоимость и низкую повторяемость, выполняются долго и не всегда надёжно. Эта проблема может быть решена с помощью микрофлюидной технологии, которая позволяет проводить эксперименты, успешно дополняя керновые исследования, а иногда даже заменяя их. Исследования на микрофлюидных чипах позволяют значительно ускорить лабораторные тесты, снизить их стоимость и повысить их точность [1, 2]. Актуальность исследования связана с созданием и подбором состава вытесняющих жидкостей для увеличения нефтеотдачи при заводнении.

В работе проведена серия экспериментов по заводнению микрофлюидных чипов, имитирующих однородную пористую структуру, различными вытесняющими жидкостями. Микрофлюидные чипы были изготовлены из ПДМС. Они представляют собой камеры с регулярным прямоугольным массивом квадратных столбиков. Расстояние между столбиками такое же, как и сторона столбика: 50, 75 и 100 мкм. Размер пористой области 7,5x20 мм. Топология микрофлюидных чипов включает один разветвлённый входной и выходной каналы.

В качестве вытесняющих жидкостей использовались вода, полимерные растворы, а также суспензии наночастиц [3]. В качестве полимера использовались полиакриламиды [4], отличающиеся молекулярной массой и плотностью заряда (производство ЗАО «Москва-Штокхаузен» и ОАО «Полифлок»). Рассмотрено три массовых концентрации полиакриламида в растворе: 0,005%, 0,01% и 0,05%. Также были приготовлены растворы наночастиц. Часть из них была получена путем разбавления высококонцентрированных силиказолей, а другая стандартным двухшаговым методом из порошка и дистиллированной воды. Массовая концентрация варьировалась от 0,01% и 2%. Размер наночастиц составлял от 10 до 35 нм.

Управление потоком вытесняющей жидкости осуществлялось с помощью многоканального высокопроизводительного микрожидкостного контроллера давления Elveflow OB1 MK3+. Контроллер оснащён двумя каналами давления от 0 до 2 бар и от 0 до 8 бар. Для канала 8 бар точность поддержания давления 100 Па, время отклика и время установления давления до 9 мс и 35 мс соответственно, минимальное приращение давления 24 Па.

Вначале было проведено экспериментальное заводнение микрофлюидных чипов водой. В микрофлюидный чип, полностью заполненный нефтью, подавалась вода с заданным расходом (в мкл/мин). Использовалась нефть с вязкостью 15,7 мПа·с и плотностью 861 кг/м<sup>3</sup>. Расход варьировался в широком диапазоне от 0,1 до 100 мкл/мин.

При расходе воды 0,1 мкл/мин коэффициент вытеснения нефти из микрофлюидного чипа с наибольшей проницаемостью (размер каналов 100 мкм) составил 48,4%. С ростом расхода вытеснения наблюдается уменьшение доли остаточной нефти. При максимальном расходе (100 мкл/мин) доля воды в микрофлюидном чипе составляет 97,5%. Проницаемость микрофлюидного чипа влияет на зависимость коэффициента вытеснения нефти от расхода воды.

Проведены серии экспериментов по заводнению микрофлюидного чипа, имитирующего однородную пористую структуру различными вытесняющими жидкостями. В качестве вытесняющих жидкостей использовались вода, полимерные растворы полиакриламида, а также суспензия наночастиц оксида кремния со средним размером 10 нм. Расход вытесняющих жидкостей составлял 0,1 мкл/мин.

В результате было показано, что при прочих равных условиях добавка наночастиц даёт сопоставимое приращение коэффициента вытеснения нефти, а в ряде случаев превосходит растворы полимеров. При этом было показано, что с уменьшением размера наночастиц эффективность вытеснения с помощью наносуспензий может быть дополнительно повышена. Помимо этого, выполнен сравнительный анализ потерь давления при закачке растворов полимеров и наносуспензий в микрофлюидный чип на различных стадиях нефтевытеснения.

Таким образом, в результате микрофлюидного исследования на рассмотренной пористой структуре, образованной регулярным прямоугольным массивом квадратных столбиков, было показано, что применение наносуспензий позволяет более эффективно увеличивать коэффициент вытеснения по сравнению с полимерами при одинаковой концентрации добавки.

### Список литературы

1. Якимов А.С., Пряжников А.И., Пряжников М.И., Минаков А.В. Изготовление микрофлюидных чипов из полидиметилсилоксана с фрезерованной канализированной поверхностью для моделирования нефтеотдачи при заводнении пористой породы // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 105-114.
2. Минаков А.В., Пряжников М.И., Пряжников А.И., Якимов А.С., Денисов И.А., Лобасов А.С., Немцев И.В., Рудяк В.Я. Применение микро- и наночастиц в задачах увеличения нефтеотдачи // Нефть. Газ. Новации, 2022, №. 2, С. 68–72.
3. Pryazhnikov M.I., Minakov A.V., Pryazhnikov A.I., Denisov I.A., Yakimov A.S. Microfluidic Study of the Effect of Nanosuspensions on Enhanced Oil Recovery // Nanomaterials, 2022, V. 12(3), P. 520, 2022.
4. Pryazhnikov M.I., Pryazhnikov A.I., Skorobogatova A.D., Minakov A.V., Ivleva Y.O. Microfluidic Study of Enhanced Oil Recovery during Flooding with Polyacrylamide Polymer Solutions // Micromachines 2023, V. 14(6), N. 1137, P. 1-16.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRZ-2020-0012).*

Солнышкина О.А.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа.

e-mail: olgasolnyshkina@gmail.com

Изучение процессов в пористых средах является сложной задачей из-за большого количества параметров, влияющих на течение жидкости. Поэтому для прогнозирования поведения пластовых жидкостей в пористой среде и их исследования на макроуровне необходимо детальное изучение гидродинамических потоков в пористой среде в микромасштабе на уровне отдельных поровых пространств, принимая во внимание их структурные особенности. Моделирование фильтрации флюидов в пласте имеет практическое значение для разработки технологий увеличения нефтеотдачи, так как макроэффекты, возникающие при фильтрации нефти в пласте, во многом определяются особенностями динамики жидкости на микроуровне в поровых каналах.

В данной работе рассматривается периодическое течение вязкой несжимаемой жидкости и капель эмульсии в поросетевой модели, состоящей из пор, соединенных между собой каналами. Поскольку изучаемые течения в микроканалах порового пространства достаточно медленные, то течение жидкости может описываться уравнениями Стокса с соответствующими граничными условиями на межфазной границе, на поверхности канала и условием периодичности течения.

Для численного решения применялся метод граничных элементов для трехмерных задач, ускорение которого произведено как за счёт высокоэффективного масштабируемого алгоритма (быстрый метод мультиполей), так и за счёт использования гетерогенных вычислительных архитектур (многоядерные CPUs и графические процессоры GPUs). Предложенный подход позволяет напрямую рассчитывать динамику деформируемых дисперсных объектов в каналах сложных форм с высокой дискретизацией поверхности, геометрия которых соответствует микроканалам пористого пласта с особенностями. Была разработана качественная триангуляция участков микромодели пористой среды в нескольких конфигурациях (Рис.1).

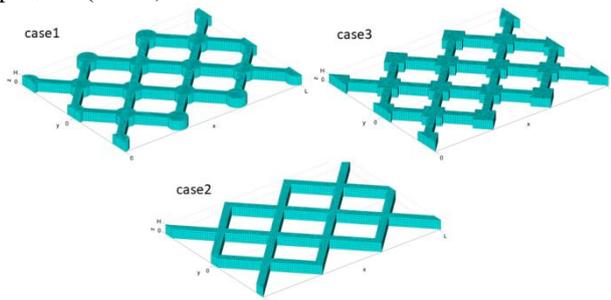
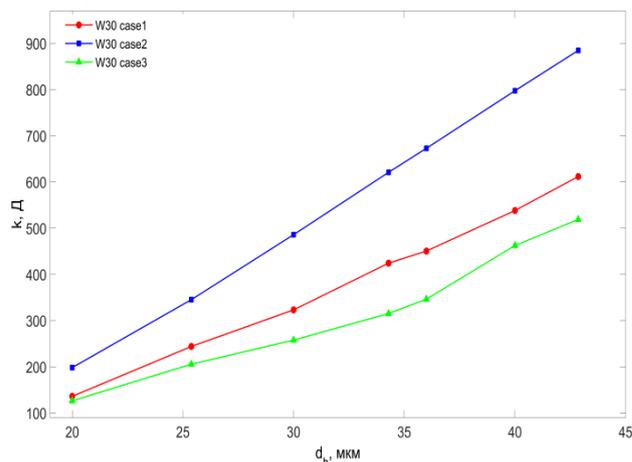


Рис. 1. Триангуляция конфигураций поросетевой модели.

Изучено изменение интегральных характеристик и особенностей картин течения однофазной жидкости в поросетевых моделях при изменении геометри-

ческих параметров сетей. Кроме изменения формы пор на пересечении каналов, варьировалась также ширина поровых каналов. Была рассчитана проницаемость микромоделей по закону Дарси для воды в зависимости от гидродинамического диаметра поровых каналов с шириной  $W=30$  мкм и  $W=40$  мкм.

Из графиков на рисунке 2 видно, что при одинаковой ширине  $W$ , проницаемость моделей без пор выше, чем у моделей с круглыми и квадратными порами. Кроме того, при изменении формы пор с круглых на квадратные, проницаемость микромодели снижается. В среднем проницаемость микромодели case1  $W=40$  мкм выше, чем проницаемость модели с  $W=30$  мкм для тех же значений гидродинамических диаметров.

Рис. 2. Абсолютная проницаемость микромоделей в зависимости от гидродинамического диаметра для  $W=30$  мкм.

Также проведены трёхмерные расчёты мобильности капель эмульсии в поровых каналах поросетевых моделей. При оценке влияния геометрии пространства на относительную скорость капле, выявлено, что капли в каналах модели с круглыми порами движутся быстрее, чем в модели без пор.

Таким образом, выявлено существенное влияние геометрических параметров сетей микроканалов на интегральные характеристики всей модели в целом, что подтверждает необходимость проведения трёхмерных расчётов для более корректного описания механики происходящих процессов на микроуровне в пористых средах, а реализованные программные подходы могут быть использованы для расчётов при подборе геометрии для плоских структур микрофлюидных чипов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 21-79-10212).

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ НА РЕЖИМЫ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В МИКРОКАНАЛЕ Y-ТИПА

Шебелева А.А.<sup>1</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup>, Пряжников М.И.<sup>1</sup>, Пряжников А.И.<sup>1</sup>, Шебелев А.В.<sup>1,2</sup>

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

пр. Свободный 79, Красноярск, 660074, Россия,

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

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

В настоящее время при разработке месторождений с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов используются методы, основанные на вытеснении жидкости при заводнении нефтяного пласта. Несмотря на большое количество работ, изучающих поведение нефти в микропористых средах, систематических данных об имеющихся режимах течения жидкостей в них все еще недостаточно. Это связано с тем, что на режимы течения жидкостей влияет достаточно большое количество параметров, в том числе физические свойства нефти и жидкости, которая ее вытесняет. В связи с этим возникает необходимость исследовать влияние концентраций наночастиц на режимы течения жидкостей в пористых средах.

Экспериментальное исследование проведено на микрофлюидном чипе, изготовленном из полимера (ПДМС) методами безмасковой литографии и анизотропного реактивно-ионного травления, с микроканалом Y-типа. Ширина и высота входных каналов составляли 40x40 мкм, длина – 3000 мкм, ширина и высота выходных каналов 40x80 мкм, что соответствует гидравлическому диаметру 53,3 мкм. Длина выходного канала равнялась 10000 мкм. Подробное описание экспериментальной установки представлено в работе [1].

Проведена серия экспериментов, направленных на изучение режимов течения в Y-образном микроканале для следующих наборов жидкостей: нефть и вода; нефть и наножидкость (суспензия наночастиц) на основе воды с массовой концентрацией оксида кремния 1 - 10%. Предварительно были измерены свойства (плотность, вязкость, межфазное натяжение) исследуемых жидкостей (нефть, вода, суспензия наночастиц). Эксперимент проводился при различных расходах нефти  $1,7 \cdot 10^{-2} \leq Q_o \leq 0,13$  мкл/с, которые подавались снизу в микроканал и расходах суспензий  $8,3 \cdot 10^{-3} \leq Q_s \leq 0,83$  мкл/с, которые подавались сверху (см. рис. 1). Сравнение результатов проводилось при фиксированном значении расхода нефти и различных расходах суспензий с концентрацией наночастиц 1 - 10%.

В ходе эксперимента были получены следующие режимы течения: снарядный, параллельный и капельный. Снарядный режим течения наблюдается при малых расходах нефти, воды и суспензий. Во всех экспериментах в этом режиме нефть является несущей средой, так как она лучше смачивает стенки микроканала. Снаряды формируются из воды и суспензий. Увеличение дисперсной фазы приводило к установлению параллельного режима течения. Жидкости в канале смешения в этом случае движутся слоями параллельно друг другу, с увеличением расхода суспензии контактная граница между жидко-

стями смещается по сечению канала. Дальнейшее увеличение расхода нефти приводит к формированию капельного режима течения. В этом режиме поток нефти отрывает отдельные капли от струи суспензии.

Разницу в характере течений можно видеть на рис. 1. Как видно, при равных значениях расходов, картины течения в сходные моменты времени разные, так на рис.1 а наблюдается смена режимов, а на рис.1 б мы наблюдаем параллельный режим.

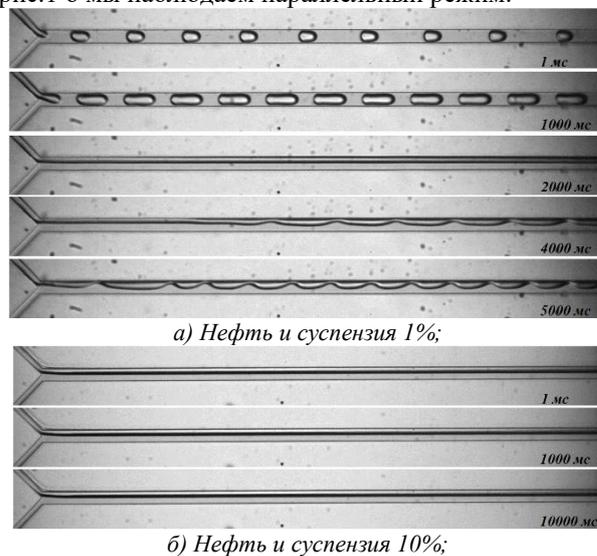


Рис. 1. Картина течения при равном значении расходов жидкостей  $Q_o = 6,7 \cdot 10^{-2}$  мкл/с;  $Q_s = 0,25$  мкл/с.

Было выявлено, что между режимами существует переходная область, в границах которой режим не являлся установившимся, а происходила циклическая смена одного режима на другой (рис. 1 а). Впервые исследовано влияние концентрации суспензии наночастиц на режимы течения в микроканале Y-типа. Установлено, что чем выше массовая концентрация оксида кремния в суспензии, тем существеннее смещаются границы между различными режимами двухфазного течения в рассматриваемом микроканале.

### Список литературы

1. Pryazhnikov M., Minakov A., Guzei D., Pryazhnikov A., Yakimov A. Flow Regimes Characteristics of Water-crude Oil in a Rectangular Y-microchannel // J. Appl. Comput. Mech. 2022. V. 8, № 2. P. 655-670.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (номер FSRZ-2020-0012).*





## СЕКЦИЯ 5

Гидрогазодинамика реагирующих сред,  
детонационные процессы





## ПИРОЛИЗ СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИБОРИДА АЛЮМИНИЯ И СВЯЗУЮЩЕГО НТРВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

Рашковский С.А., Кузнецов В.Т., Басалаев С.А., Костюшин К.В.

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

В настоящее время значительное внимание уделяется исследованию высокоэнергетических материалов, содержащих добавки бора и лёгких металлов, таких как алюминий или магний. Наибольший интерес в качестве компонента таких энергоносителей вызывает бор [1]. Однако бор как энергоноситель имеет существенный недостаток, а именно низкая полнота сгорания из-за образования оксидной плёнки. В последнее время в качестве альтернативы бору рассматривают бориды и додекабориды алюминия. Хотя исследования боридов и додекаборидов алюминия в качестве энергетических добавок в состав высокоэнергетических материалов начались сравнительно недавно уже сейчас получены довольно интересные результаты. Исследование закономерностей термического разложения конденсированного вещества при стационарном распространении в нём фронта химической реакции представляет значительный и теоретический и практический интерес. Такой режим называется линейным пиролизом, реализующийся чаще всего при высокотемпературной деструкции [2].

В настоящей работе представлены экспериментальные исследования пиролиза бинарных композиций СКДМ-80+AlB<sub>12</sub> и НТРВ+AlB<sub>12</sub>, в разных процентных пропорциях, под действием потока лучистой энергии оптической печи УРАН-1 [3]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

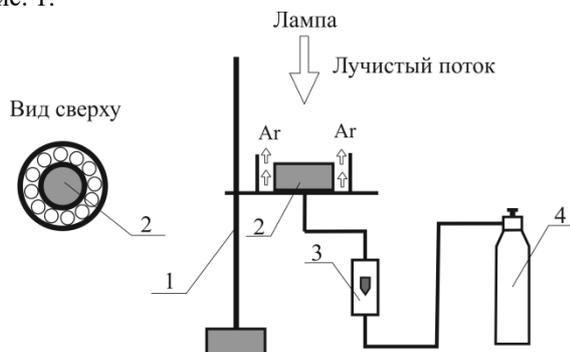


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.  
1- держатель, 2-образец, 3-ротаметр, 4-баллон газа.

Экспериментальная установка состоит из держателя 1, на котором закреплен исследуемый образец 2, обдуваемый потоком газа, в качестве газа использовался азот. Расход газа измерялся ротаметром 3. Для предотвращения воспламенения исследуемого образца в процессе пиролиза значение расхода азота из баллона 4 устанавливалось равным 0.13 м<sup>3</sup>/час. Проводилась скоростная киносъемка процесса пиролиза. Изменялась массовая скорость пиролиза в зависимости от интенсивности теплового излучения. Отработка методики проводилась на составах уротропина с алюминием марки АСД-4.

Интенсивность светового потока измерялась калориметрическим методом. Для определения плотности светового потока экспериментально измерялся темп нагрева медного диска, под действием излучения, поступающего к зачерненной поверхности. Плотность светового потока рассчитывалась по формуле:

$$q = \frac{mc}{(1-b)S_d} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t},$$

где  $m$  – масса диска,  $c$  – теплоёмкость,  $S_d$  – площадь зачерненной поверхности диска,  $b$  – коэффициент отражения,  $\frac{\Delta T}{\Delta t}$  – темп нагрева.

Массовая скорость пиролиза на единицу облучаемой поверхности определялась по формуле:

$$u = \frac{m_0 - m_1}{(t - t_c)S},$$

где  $m_0$  – начальная масса образца;  $m_1$  – масса образца после опыта;  $t$  – время облучения;  $t_c$  – время выхода процесса на стационарный режим;  $S$  – площадь облучаемой поверхности.

Анализ полученных результатов показал, что процесс разложения рассматриваемых бинарных композиций более сложный, чем простая деструкция связующего, и значительно изменяется в зависимости от массовой доли AlB<sub>12</sub> в составе [4]. Анализ данных показал, что отношение массовой скорости деструкции к массовой доле связующего в смеси остается почти постоянным при всех концентрациях AlB<sub>12</sub>. Вместе с тем, отклонение этого отношения от постоянного значения указывает на то, что при разложении смеси происходит унос частиц AlB<sub>12</sub> оттекающими газообразными продуктами разложения связующего. Это подтверждается результатами видеосъемки, на которых видны яркие треки, создаваемые, видимо, уносимыми частицами AlB<sub>12</sub>.

### Список литературы

1. Фролов Ю. В., Пивкина А.Н., Завьялов С.А., Муровьев Н.В. Физико-химические свойства компонентов энергетических конденсированных систем // Хим. физика. – 2010. Т.29, № 11. – С. 42-49.
2. Штейнберг А.С. Быстрые реакции в энергоёмких системах: высокотемпературное разложение ракетных топлив и взрывчатых веществ. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2006. –208 с.
3. Архипов В.А., Жуков А.С., Кузнецов В.Т., Золоторёв Н.Н., Осипова Н.А., Перфильева К.Г. Характеристики зажигания и горения конденсированных систем с энергетическими наполнителями // Физика горения и взрыва – 2018. Т.54, № 6. – С. 68-77.
4. Basalaev S.A. et al. 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2233 012011

Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-19-00541).

## АНАЛИЗ СКОРОСТНОЙ ВИДЕОСЪЁМКИ ГОРЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОЙ СМЕСИ ОБЕДНЁННОГО ТОПЛИВА В ВИХРЕВОЙ ГОРЕЛКЕ С ПОМОЩЬЮ POD РАЗЛОЖЕНИЯ

Гореликов Е.Ю.<sup>1,2</sup>, Литвинов И.В.<sup>1,2</sup>, Шторк С.И.<sup>1</sup>

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

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

В настоящее время проблеме избыточных выбросов  $\text{NO}_x$  уделяется много внимания [1]. Одним из эффективных методов снижения выбросов  $\text{NO}_x$  – сжигание обеднённого предварительно перемешанного топлива. Для стабилизации горения обеднённых предварительно перемешанных топлив используют различные методы, к примеру: стабилизация при помощи закрутки потока или стабилизация пламени за плохообтекаемым телом [2].

Закрученные потоки широко используются в камерах сгорания газовых турбин и вихревых горелках для эффективного перемешивания и горения топливовоздушной смеси за счёт образования рециркуляционной зоны. Закрученные течения с высокой степенью закрутки, как правило не являются стационарными из-за явления распада вихря и образования прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ), которое является источником высокоуровневых пульсаций, возникающих в потоке [3].

Для исследования влияния ПВЯ на процессы горения в закрученном потоке применяют различные методы исследования. Особенно широко распространены оптические методы исследования, такие как лазерно-доплеровская анемометрия, метод цифровой трассерной визуализации (PIV), хемилюминесценции пламени, лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF), скоростная визуализация фронта пламени и другие.

В данной работе рассмотрена методика анализа скоростной визуализации фронта обеднённого пламени в вихревой горелке радиального типа при варьировании закрутки. Приведён анализ высокоскоростной визуализации фронта закрученного пламени и определены частоты ПВЯ. Проведено сравнение полученных частот по визуализации и полученных при помощи отборников давления.

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1. Воздух подается вихревой воздуходувкой из комнаты, а расход измеряется ультразвуковым расходомером. Затем воздух поступает на радиальный завихритель с поворотными лопатками, после которого поток поступает в смешительную трубку, где перемешивается с пропаном. Пропан подается в смешительную камеру через кольцевой канал, в котором около каждой лопатки сделано отверстие диаметром 2 мм. Расход пропана контролируется при помощи регулятор расхода газа Bronkhorst откалиброванного на пропан. Газовое топливо эффективно перемешивается с закрученным воздушным потоком в камере затем поступает в зону горения, находящейся за сужающей горловиной. Для регистрации изображения используется скоростная камера Mega speed 90k-sc-b16 с разрешением 1280 x 800 монохром

и скоростью съёмки при полном разрешении 4000 кадров в секунду, которая имеет диапазон спектральной чувствительности от 400 до 1000 нм и 8 битный динамический диапазон.

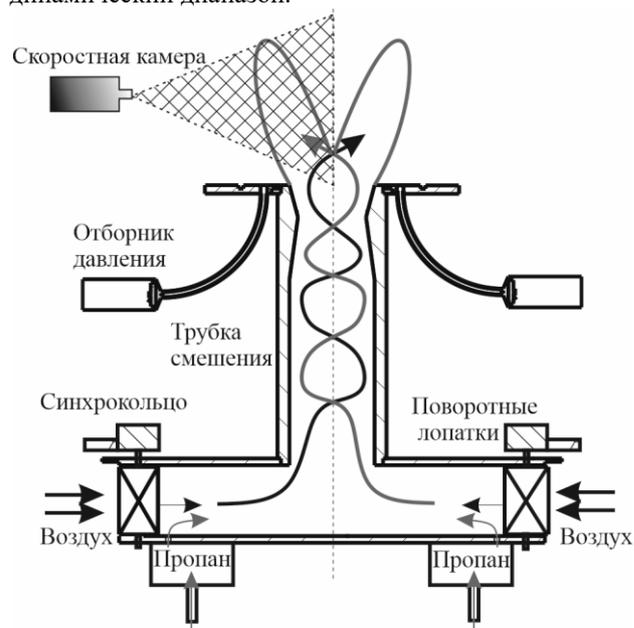


Рис. 1 Схема экспериментальной установки

Получаемые с камеры последовательности кадров скоростной съёмки обрабатывались в среде MatLab. Для анализа изображений был использован фильтр “Canny”, алгоритм работы которого состоит в поиске максимумов на изображении и их фильтрации. Работа алгоритма подробно описан в [4].

Для анализа вклада ПВЯ в процесс горения использовался метод разложения на ортогональные моды (метод POD).

### Список литературы

1. Nemitallah M. A., Abdelhafez A. A., Habib M. A. Global Warming and Emission Regulations // Approaches for Clean Combustion in Gas Turbines. – Springer, Cham, 2020. – P. 1–12.
2. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. “Swirl Flows”, Abacus Press, Tunbridge Wells, UK. (1984).
3. Syred N. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems // Progress in Energy and Combustion Science. 2006. (32). pp. 93–161.
4. Canny J. A computational approach to edge detection // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986. – V. 6. – P. 679–698.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-19-00769)

Ссылка на информацию о проекте:  
<https://rscf.ru/project/21-19-00769/>.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЫГОРАНИЯ ВОДОРОДА ПРИ ЕГО ПОДАЧЕ В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СПУТНЫЙ ПОТОК

Арефьев К.Ю.<sup>1,2</sup>, Гуськов О.В.<sup>1</sup>, Кукшинов Н.В.<sup>1,2</sup>, Мамышев Д.Л.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ГНЦ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова», 111116, ул. Авиамоторная, д. 2, Москва, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (НИУ)», 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, Москва, Россия  
e-mail: dlmamyshev@ciam.ru

Для оценки работоспособности систем охлаждения в сопряжённых задачах теплообмена с помощью инженерных расчётов необходимо знать значения коэффициента полноты сгорания топлива в проточных воздушно-газовых каналах, а также границы пределов срыва пламени [1]. Коэффициент полноты сгорания позволяет найти количество теплоты, передаваемое в стенку.

Для определения коэффициента полноты сгорания при горении водорода на сегодняшний день распространена интегральная обобщенная зависимость выгорания из [2]. Данная зависимость, в частности, учитывает геометрию канала, число форсунок, длину факела и коэффициент избытка окислителя. В работе [3], дополнительно, рассматривается влияние степени неравномерности распределения топлива по сечению каналов и относительного изменения давления. Сложность физического процесса, способ подачи горючего, геометрия канала, наличие отрывных зон, степень турбулентности потока и другие факторы усложняют создание безразмерных комплексов, применимых в широких диапазонах условий. Ввиду этого важно проводить апробацию применения той или иной интегральной зависимости.

В рамках данной работы проводится сравнение результатов при использовании интегральной безразмерной зависимости выгорания водорода [2] и результатов численного моделирования. Сравнение проводится для цилиндрического канала с диаметром 100 мм, в который подается квазивоздух через профилированное сопло с числом  $M = 2$  на срезе. Водород подается соосно набегающему потоку из канала с диаметром 10 мм.

Численное моделирование проводится на структурированной многоблочной сетке, содержащей около 200 000 ячеек. На входе в расчётную область задаются полные параметры потока (полное давление  $p_0$  и полная температура  $T_0$ , превышающая температуру самовоспламенения) и состав квазивоздуха, рассчитываемого на основе термодинамического равновесия в зависимости от температуры. На форсунке задается расход водорода в зависимости от коэффициента избытка окислителя и полная температура  $T_0$ . На выходе – статическое давление. На стенках – условия прилипания и температура стенки. В качестве модели турбулентности используется  $\gamma$ - $Re_\theta$  модель [4], а в качестве химико-кинетического механизма модель [5]. Моделирование проводится с использованием квазиламинарной аппроксимации (QLA) (по TCI). Валидация расчётных моделей на основе известных экспериментов проведена в ряде работ, в частности, в [6]. Сходимость по сетке проводится на

основе коэффициента полноты сгорания топлива и распределения давления на стенки вдоль канала.

В результате численного моделирования получены значения коэффициента полноты сгорания топлива при коэффициенте избытка окислителя 1 и 2, которые также сравниваются со значениями, полученными по интегральной кривой выгорания (рис. 1).

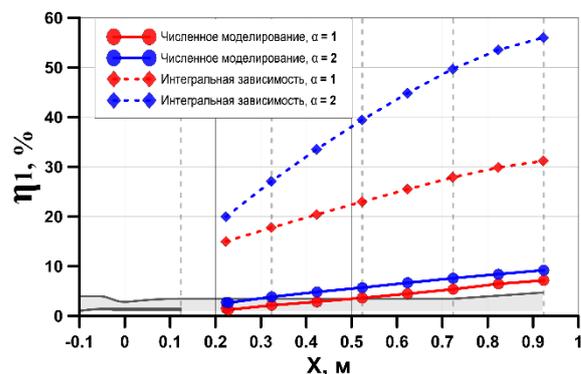


Рис. 1. Распределение коэффициента полноты сгорания вдоль канала для различных поперечных сечений при коэффициенте избытка окислителя = 1 и 2.

Как видно, различие между расчётами составляет ~ 80% для коэффициента избытка окислителя 1. Стоит отметить, что безразмерная интегральная кривая обобщена на основе экспериментов [2], а результаты численного моделирования согласуются с результатами на основе экспериментальной камеры сгорания [7].

### Список литературы

1. Старов А.В. Определение пределов устойчивого горения при высоких сверхзвуковых скоростях потока в канале // Вестник НГУ. Серия: Физика, Т.3, выпуск 2, 2008, 14 с.
2. Аннушкин Ю.М. Основные закономерности выгорания турбулентных струй водорода в воздушных каналах // Физика горения и взрыва, Т. 9, № 4, 1973. С. 473-483.
3. Строкин В.Н. Результаты экспериментального исследования стабилизации горения и выгорания водорода в модельных камерах сгорания ГПВРД // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики, №2, 2000, С. 33-40.
4. Langtry R.B., Menter F.R. Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes // AIAA Journal, Vol. 47, No. 12, 2009. pp. 2894-2906.
5. Hong Z., Davidson D. F., Hanson R. K. An improved H2/O2 mechanism based on recent shock tube/laser absorption measurements // Combustion and Flame, Vol. 158, 2011. pp. 633-644.
6. Zakharov V.S., Guskov O.V., Prokhorov A.N., Berezhnoy V.N. Computational and experimental study of the influence of the shape of nozzle supersonic part on the flow structure in the gasdynamic flow path of a model high-altitude test facility // Thermophysics and Aeromechanics, 2021, 28(2), стр. 153-173.
7. Davidenko D.M., Gökalp I., Dufour E., Magre P.. Systematic Numerical Study of the Supersonic Combustion in an Experimental Combustion Chamber // 14th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2006. P. 25.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА ПРИ СПУТНОЙ ПОДАЧЕ ПОСРЕДСТВОМ ГЕНЕРАЦИИ АКУСТИКО-ВИХРЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ИНЖЕКТОРЕ

Серебряков Д.И.

ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»,  
111116, ул. Авиамоторная, д. 2, Москва, Россия

e-mail: diserebryakov@ciam.ru

В работе рассматривается возможность интенсификации смешения и горения водорода при спутной подаче посредством акустико-вихревых колебаний, генерируемых в инжекторе.

Представлены результаты расчётных исследований влияния акустико-вихревых колебаний на интенсификацию смешения и горения газообразного водорода в модельном канале, проведённых в нестационарной постановке. В расчётах использовалась модель горения водорода в воздушном потоке, включающая в себя 9 компонентов, участвующих в 30 реакциях. Модельный канал представляет собой канал переменного сечения, в который поступает воздушный поток. Спутно воздушному потоку через форсунку инжектора подаётся водород (рис. 1). При этом на форсунке реализуется звуковой перепад давлений. Непосредственно в канале инжектора устанавливается прямоугольный в поперечном сечении профиль. В результате поочерёдного схода отрывных зон с верхней и нижней сторон профиля создаётся цепочка вихрей, представляющая собой дорожку Кармана [1]. Генерируемые таким образом акустико-вихревые колебания в канале инжектора вызывают пульсацию водородной струи на выходе из форсунки как по газодинамическим параметрам, так и по направлению (рис. 2).

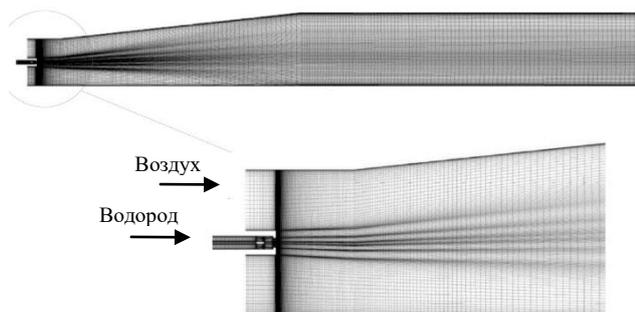


Рис.1. Область расчетной сетки вблизи инжектора

Проведена оценка степени влияния акустико-вихревых колебаний на интенсификацию смешения и горения водорода путём сравнения полученных результатов со случаем стационарного истечения водо-

рода из форсунки. Было получено, что в рассмотренном диапазоне параметров расчётной модели в случае пульсации водородной струи под воздействием акустико-вихревых колебаний в канале инжектора коэффициент полноты сгорания, оценённый по массовому содержанию несгоревшего водорода, имеет значение на величину до 0,1 больше чем в случае стационарного его истечения (рис.3).

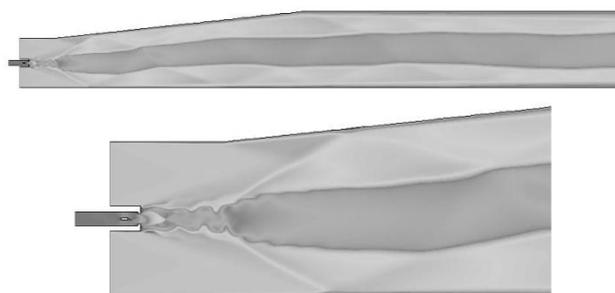


Рис.2. Пульсации потока, вызванные акустико-вихревыми колебаниями в инжекторе

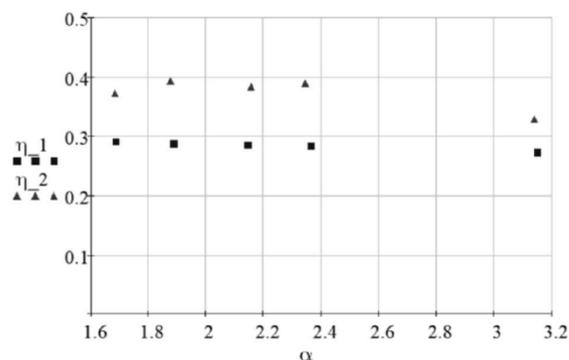


Рис.3. Значение коэффициента полноты сгорания водорода в модельном канале без акустико-вихревых колебаний ( $\eta_1$ ) и при их генерации, соответственно, ( $\eta_2$ ) в зависимости от коэффициента избытка окислителя ( $\alpha$ )

### Список литературы

1. Милн - Томсон Л. Теоретическая гидродинамика. – М.: Мир, 1964. 660-661 с.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ КОНУСНОГО ПЛАМЕНИ, НАПРАВЛЕННОГО НА ПЛОСКУЮ ОХЛАЖДЕННУЮ ПРЕГРАДУ

Сластная Д.А.<sup>1</sup>, Хребтов М.Ю.<sup>1,2</sup>, Мулляджанов Р.И.<sup>1,2</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>

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

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

Изучение нестационарных режимов горения является актуальной и важной задачей, в виду их возникновения и негативного влияния в различных технических системах. Возмущения в пламени приводят к неоднородности процесса горения и неравномерному выделению тепловой энергии. Это может влиять на эффективность сгорания, повышение выбросов вредных веществ, образование канцерогенных соединений и возникновение колебаний пламени. Исследование возмущений позволяет оптимизировать процессы горения для обеспечения более эффективного и экологически чистого сгорания, а также повысить долговечность технических систем и снизить уровень шума.

В работе исследуется возникновение возмущений в слое смешения импактного пламени, т.е. пламени, направленном на плоскую преграду. Особенностью выбранной конфигурации является взаимодействие пламени и стенки, что влияет на структуру пламени и его стабилизацию. Работа выполнена путём прямого численного моделирования с учётом детального кинетического механизма горения, что позволяет исследовать процесс, не прибегая к дополнительным физическим и химическим приближениям. Основной трудностью численного исследования реагирующих потоков оказывается учёт химической кинетики. Использование подробных механизмов реакции накладывает большие ограничения на потребляемую вычислительную мощность и время расчёта.

Объектом исследования является струя предварительно перемешанной метановоздушная смеси с коэффициентом избытка топлива  $\phi = 0.92$ , которая вытекает в воздушную атмосферу из осесимметричного сужающегося сопла Витошинского с выходным диаметром 15 мм при числе Рейнольдса  $Re = 1000$ . Преградой является плоская поверхность, на которой поддерживается условие постоянной температуры 371 К. Исследуются конфигурации с различным расстоянием от поверхности до кромки сопла  $h/d = 1, 2, 3$ . Вычислительная область представляет собой сектор цилиндра с углом раствора  $5^\circ$  (предполагается осевая симметрия течения). Вычислительная сетка состоит из гексагональных ячеек и имеет адаптивное сгущение к оси симметрии. Минимальное разрешение ячейки составляет 5 мкм.

Вычисления проведены на основе открытого кода OpenFOAM, для моделирования гидродинамики в котором для дискретизации течения применяется метод конечных объёмов. Химическая кинетика определялась с помощью расчётного пакета *laminarSMOKE* [1], позволяющего учитывать детальные механизмы реакции, путём введения оператора разделения Стренга для корректного разрешения

членов переноса и реакции в уравнениях на массовые доли и температуру. Уравнения набора элементарных реакций, собранных в единый кинетический механизм, задавались как внешний файл с описанием реакций в формате CHEMKIN. Выбранный кинетический механизм GRI-MECH 3.0 включал в себя 53 химических соединений и 324 элементарных реакций. Вычисления проводились в нестационарной постановке с учётом сил плавучести.

Получены поля скорости, температуры и массовых долей компонентов реакции. На рис. 1 представлены мгновенные поля температуры для трёх конфигураций расположения преграды  $h/d = 1, 2, 3$ . Проведено сравнение усреднённых полей температуры с экспериментальными данными, полученными в ИТ СО РАН методом плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции [2].

В расчётах видны осесимметричные возмущения, распространяющиеся вдоль фронта пламени. Их возникновение связано с развитием сдвиговой неустойчивости в слое смешения в области протекания химической реакции. Амплитуда возмущений увеличивается при увеличении расстояния до стенки. Результат будет представлен в докладе.

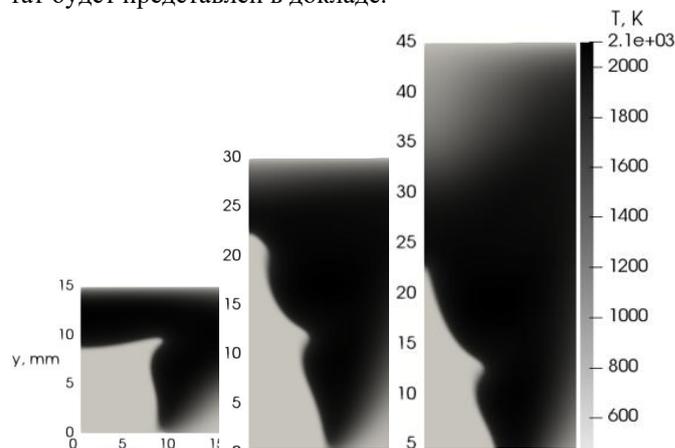


Рис. 1. Мгновенные поля температуры для конфигураций  $h/d = 1, 2, 3$  (слева на право)

### Список литературы

1. Cuoci, Alberto, et al. "Numerical modeling of laminar flames with detailed kinetics based on the operator-splitting method." *Energy & fuels* 27.12 (2013): 7730-7757
2. Tolstoguzov R. V., Chikishev L. M. Temperature field measurements between a Bunsen flame and flat a cold plate by using PLIF // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2022. – Т. 2233. – №. 1. – С. 012014.

Работа выполнена в рамках государственного задания в ИТ СО РАН.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА С ДОБАВКАМИ ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТИ ДРЕВЕСИНЫ РАЗЛИЧНЫХ ПОРОД

Слюсарский К.В., Болур Э.

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

Увеличение ресурсной базы топлив различного происхождения, в том числе и углерод-нейтральных [1], является важным направлением развития современной науки. Пиролизная жидкость считается одним из примеров таких веществ, имеющая низкую стоимость и высокую реакционную способность. В настоящее время, в отечественной и зарубежной литературе представлено большое число технологических решений на основе процесса пиролиза, одним из побочных продуктов которого является пиролизная жидкость [2]. В Европе свойства пиролизной жидкости для сжигания регламентируются стандартом ASTM- D7544-12 [3]. Данный стандарт приводит нормативные значения свойств пиролизной жидкости, характерные для быстрого пиролиза. Жидкость, полученная в ходе медленного пиролиза, значительно отличается от неё в части вязкости, зольности и температуры потери текучести. Также следует отметить нестабильность свойств получаемой таким образом жидкости, вызванную волатильностью характеристик используемой биомассы. Эффективным решением является сжигание пиролизной жидкости совместно с низкорекреационным топливом, что позволит не только снизить выбросы парниковых газов в атмосферу, но и вовлечь ряд низкокачественных топлив в производство энергии.

Исследования закономерностей горения двухкомпонентных смесей уголь-пиролизная жидкость в литературе представлены в крайне ограниченном объёме. В частности, в [4] представлены характеристики зажигания и горения углей и отходов двух видов в составе смеси с рапсовым маслом, а в [5] – в отношении смеси низкорекреационного угля с пиролизной жидкостью, полученной в результате парового пиролиза резиновых изделий различной концентрацией в диапазоне от 0 до 30 масс.%. В обеих работах отмечается, что комплекс возникающих в ходе зажигания и горения процессов не позволяет однозначно сформировать механизм их поведения. Данная работа посвящена исследованию свойств смесей антрацита с пиролизной жидкостью переработки сосны и березы в диапазоне температур 500–700 °С.

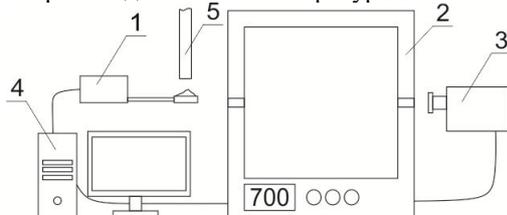


Рис. 1 – Экспериментальный стенд зажигания и горения твёрдых топлив: 1 – привод, 2 – камера сгорания, 3 – видеокамера, 4 – ПК, 5 – газоанализатор.

Исследования производились с помощью экспериментального стенда зажигания и горения, схема которого приведена на рис. 1. Более подробное опи-

сание экспериментальной процедуры, а также свойств топлива приведены в [6]. Задержки времен зажигания образцов антрацита с различным содержанием добавок пиролизной жидкости различного происхождения, приведены на рис. 2.

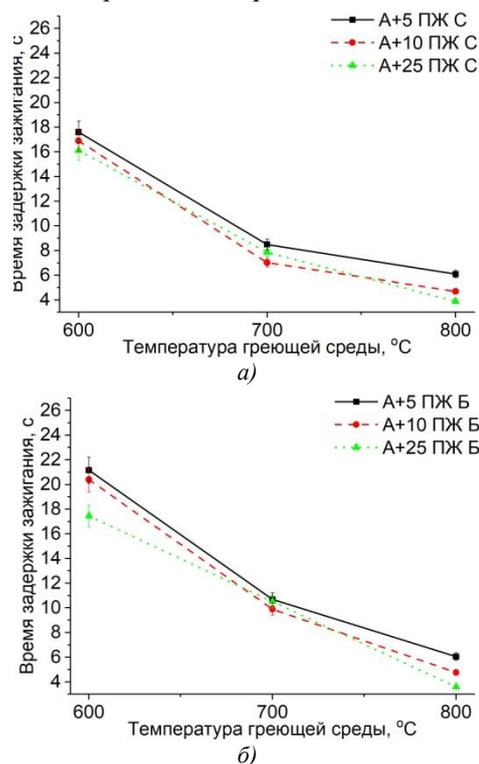


Рис. 2 – Зависимость времен задержки зажигания антрацита с пиролизной жидкостью сосны (а) и березы (б).

### Список литературы

1. Spencer D. BP Statistical Review of World Energy. 2022.
2. Fakayode O.A., Wahia H., Zhang L., Zhou C., Ma H. State-of-the-art co-pyrolysis of lignocellulosic and macroalgae biomass feedstocks for improved bio-oil production- A review // Fuel. 2023. V. 332. P.126071. 1-10.
3. ASTM- D7544-12 Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel. 2017.
4. Feoktistov D. V., Glushkov D. O., Nurpeiis A. E., Orlova E. G., Samoilo A. S., Zhizhaev A. M. Impregnation of different coals and biomass with rapeseed oil for intensifying their ignition in a heated air stream during oil-free boiler start-up // Fuel Process Technol. 2022. V. 236. P. 107422.1-15.
5. Larionov K. B., Sliusarskiy K. V., Tsibulskiy S. A., Kaltaev A. Z., Berezikov N. I., Gorshkov A. S. Activation of Anthracite Combustion Using Pyrolysis Oil from Thermal Conversion of Waste Car Tires // ACS Omega. 2021. V. 6. P. 19731–19739.
6. Слюсарский К. В., Ларионов К. Б., Асильбеков А., Шуатаев М. К. Исследование закономерностей окисления и зажигания смесей пиролизной жидкости с низкорекреационным углем // Известия ТПУ. 2022. Т. 333. № 12. С. 140–50.

Работа поддержана Грантом Президента РФ  
(грант № МК-2563.2022.1.2).

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ НА ФРОНТЕ ДЕТОНАЦИИ ТАТБ

Тен К.А.<sup>1,3</sup>, Пруузл Э.Р.<sup>1</sup>, Рубцов И.А.<sup>1,2</sup>, Кашкаров А.О.<sup>1</sup>,  
Халеменчук В.П.<sup>1,2</sup>, Студенников А.А.<sup>1,2</sup>, Шехтман Л.И.<sup>3</sup>, Пиманов П.А.<sup>3</sup>,  
Гармашев А.Ю.<sup>4</sup>, Смирнов Е.Б.<sup>4</sup>, Музыря А.К.<sup>4</sup>, Просвирнин К.М.<sup>4</sup>, Галиулин И.Г.<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> ЦКП "СКИФ", Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,  
Никольский пр., 1, Кольцово, 630559, Россия

<sup>3</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
пр. Лаврентьева пр., 11, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>4</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт технической физики  
имени академ. Е.И. Забабахина», ул. Васильева, 13, Снежинск, 456770, Россия

Получение экспериментальной информации о зоне химической реакции во взрывчатых веществах (ВВ) сильно затруднено ввиду экстремальности параметров вещества (давления > 30 ГПа, время < 1 мкс). При математическом моделировании химических процессов в этой зоне в настоящее время используются формально-кинетические модели. В моделях задаются полуэмпирические зависимости, в которых функциональный вид устанавливается на основе теоретических соображений, а экспериментальные результаты используются для определения численных значений параметров.

Метод синхротронной рентгенографии предоставляет новые возможности для получения экспериментальных данных по детонационным характеристикам ВВ, позволяющих изучать кинетику происходящих процессов [1,2]. Метод даёт возможность, во первых: визуализировать динамику исследуемого процесса; во вторых получать распределение плотности вещества за фронтом детонационной волны. На записанных рентгенограммах видна динамика характерных зон превращений в ВВ: исходное ВВ; зона химической реакции и процесс разлёта продуктов взрыва.

Измерение распределения поглощения на фронте детонации проводилось на ускорительном комплексе ВЭПП-4М (в ИЯФ СО РАН), который работал в режиме с шестью банчами (сгустками). Такой режим работы ускорителя позволил уменьшить время между кадрами до 200 нс. Для увеличения интенсивности рентгеновского излучения использовался 7-ми полюсный вигглер, и энергия электронов была увеличена до E=4.5 ГэВ. Измерение интенсивности синхротронного излучения (СИ) проводилось детектором DIMEX-3М с линейным разрешением 100 мкм [3]. В опытах использовались заряды ТАТБ диаметром 40 мм. Кривизна фронта детонации измерялась на фоторегистрограмме (скорость фоторазвёртки 3 км/с) и затем интерполировалась кривой четвертого порядка. На восстановленном распределении плотности видна зона повышенной плотности (~ 0,5 мм), зона более плавного изменения плотности (~ 21 мм),

за которой следует зона разлёта продуктов взрыва (рис.1).

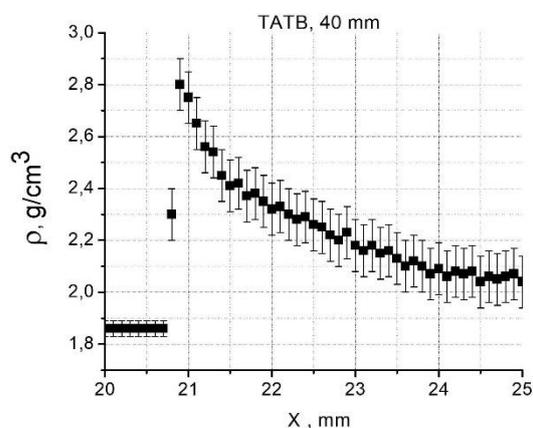


Рис.1. Распределение плотности на фронте детонации в ТАТБ.

Данные о распределении плотности вещества на фронте детонационной волны позволят калибровать газодинамические расчёты с использованием различных моделей кинетики взрывчатого превращения, провести уточнение уравнений состояния ВВ, продуктов взрыва и их смесей, и совместно с результатами других методик дадут возможность построения физической модели возбуждения детонации в гетерогенных ВВ.

## Список литературы

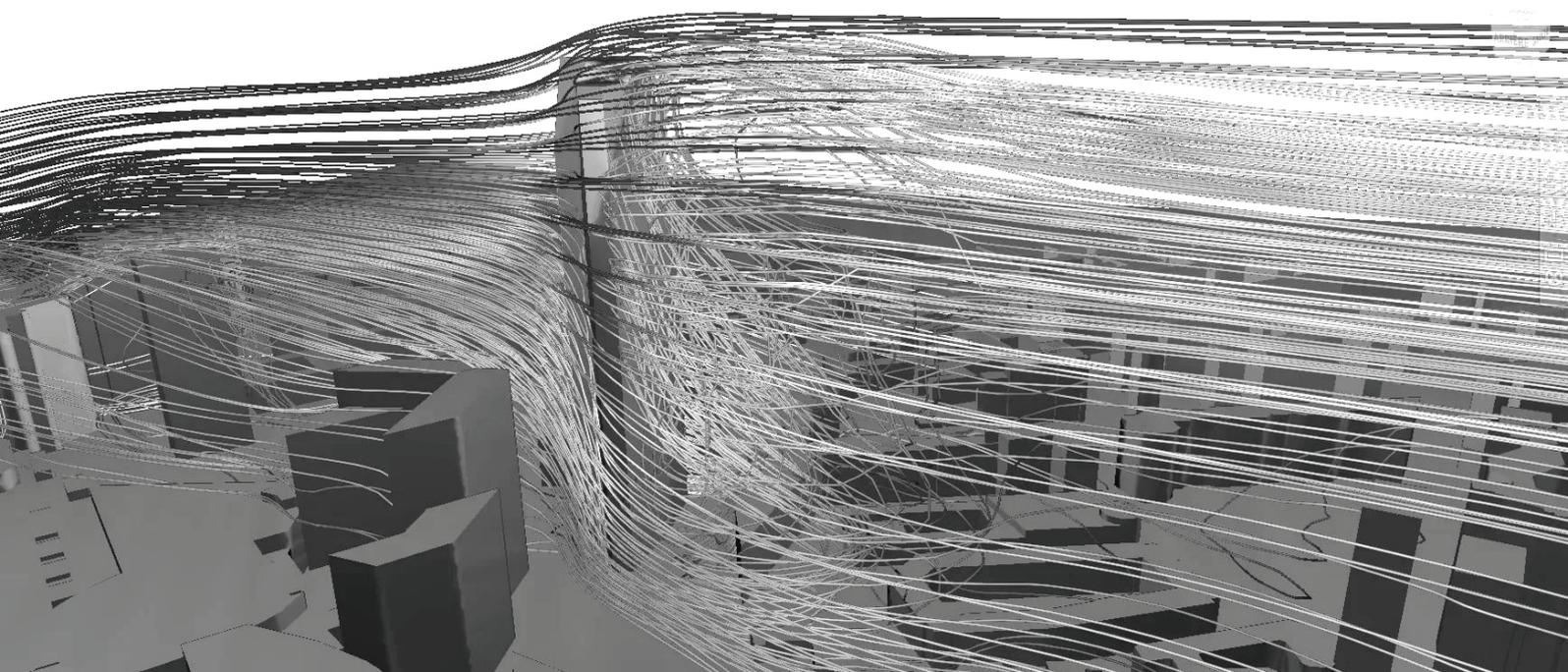
1. Аульченко В.М., Жуланов В.В., Кулипанов Г.Н., Тен К.А., Толочко Б.П., Шехтман Л.И. Исследование быстропротекающих процессов рентгенодифракционными методами в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения. //УФН. 2018. Т. 188. № 6. С. 577–594
2. Пруузл, Э. Р., Тен К. А., Толочко Б. П., Титов В.М. Реализация возможностей синхротронного излучения в исследованиях детонационных процессов. //ДАН, Техническая физика. 2013. Т. 448, № 1. С. 38–42.
3. Aulchenko, V.M, Bondar A.E., Kudryavtsev V.N., et al. GEM-based detectors for SR imaging and particle tracking. //Journal of Instrumentation. 2012. V. 7. P. 1-18.





## СЕКЦИЯ 6

# Численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике





Бугай Ю.В.<sup>1</sup>, Черевко А.А.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет (НГУ),  
ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

Благодаря развитию в последние годы аппаратуры визуализации и методов компьютерного моделирования стало возможным использование в клинической практике сложных моделей гемодинамики. С их помощью может проводиться неинвазивная диагностика и планирование сложных операций.

Неотъемлемой частью при проведении сосудистых операций является гемодинамический мониторинг, одной из задач которого является раннее обнаружение интраоперационных осложнений. По этой причине, их прогнозирование является актуальной задачей как с практической, так и с научной точек зрения. Для получения интраоперационного прогноза необходима модель гемодинамики, отличающаяся простотой и быстродействием.

При разработке такой модели необходимо использовать массив клинических данных о параметрах кровотока. Получение таких данных, их подготовка и анализ представляет собой трудоёмкий процесс. Вместе с этим, некоторые методы вычислительной гемодинамики могут требовать массивы данных большого объёма. Например, точность прогноза нейросетевых моделей, отличающихся большим быстродействием, зачастую зависит от количества данных, используемых при их обучении. В тоже время модели, основанные на решении уравнений Навье-Стокса в упругих трубках, не нуждаются в таком большом количестве данных для верификации, но требуют за-

частую неприемлемо большого расчётного времени. По этой причине, наиболее предпочтительным является подход, при котором для обучения нейросетей используется большое количество данных компьютерного моделирования основанного, в свою очередь, на клинических данных.

Разработана рекуррентная нейросетевая модель, позволяющая осуществлять оценку значений внутрисосудистого давления по данным скорости пульсовой волны. Обучение модели производилось с использованием базы данных о кровотоке для 4374 виртуальных пациентов в возрасте 25-75 лет, полученной в работе [1] при помощи компьютерного моделирования на основе клинических данных.

Полученные результаты могут быть потенциально использованы при интраоперационном гемодинамическом мониторинге, предоставляя дополнительную важную информацию о параметрах кровотока.

#### Список литературы

1. Charlton P.H., Mariscal Harana, J., Vennin, S., Li, Y., Chowienzyk, P. & Alastruey, J. Modelling arterial pulse waves in healthy ageing: a database for in silico evaluation of haemodynamics and pulse wave indices // *AJP Hear. Circ. Physiol.* 2019. V. 317, N 5. P. H1062-H1085.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-11-00264).*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАВ НА КИНЕТИКУ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТОВ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДОВ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ**Жданов Р.К.<sup>1,2</sup>, Гец К.В.<sup>1,2</sup>, Божко Ю.Ю.<sup>1,2</sup>, Белослудов В.Р.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет

e-mail: rav@niic.nsc.ru

Газовые гидраты – это соединения включения, имеющие кристаллическую структуру, образующиеся путем включения молекул газа в полости, имеющиеся в структуре гидрата, образованном молекулами воды. Лёгкие углеводороды, углекислый газ, азот, сероводород и их смеси являются наиболее распространёнными газами, образующим гидраты. В большинстве случаев для роста газовых гидратов требуется создание необходимых термодинамических условий, обычно это высокое давление и/или низкая температура. Отличительной особенностью данных соединений является большое удельное содержание газа в структуре, что можно использовать для хранения и транспортировки различных газов и их смесей. Также стоит отметить наличие огромных запасов природного газа, хранящегося в виде гидратов, которые в перспективе могут быть использованы в качестве дополнительного источника данного вида топлива. В настоящее время с использованием газовых гидратов возможно создать эффективные технологии по разделению газовых смесей, в том числе и для улавливания и дальнейшего захоронения парниковых газов, технологий опреснения морской воды и пр. Несмотря на большое количество преимуществ, стоит указать на не до конца решённую проблему медленной кинетики образования гидратов, так скорость образования гидратов сильно зависит от переохлаждения системы, избыточного давления, отношения компонентов системы и наличия/отсутствия промоторов или ингибиторов.

Использование поверхностно-активных веществ (ПАВ) оказывается очень эффективным способом повысить эффективность гидратообразования. При этом было обнаружено, что лаурилсульфат натрия (SDS) является наиболее эффективным соединением ускоряющим процесс роста гидрата и в то же время не влияет на термодинамические условия равновесия гидратов. Было обнаружено, что достаточно лишь небольшой концентрации SDS (менее 1000 ppm). Использование других типов ПАВ также показывает значительную эффективность.

В данной работе проводилось исследование влияния молекул SDS на кинетику образования газовых

гидратов метана и на сетку водородных связей молекул воды, т.к. именно за счёт её перестроения происходит формирования кристаллической структуры гидрата. Исследование проводилось при помощи методов молекулярной динамики с использованием пакета LAMMPS. Для моделирования была сконструирована система, состоящая из 3000 молекул воды. Количество молекул SDS, так же как и количество молекул метана варьировалось в широких пределах. Начальное положение молекул во всех модельных системах определялось случайным образом, что позволило добиться равномерного распределения их по объёму. Молекулы воды описывались потенциалом TIP4P/Ice, т.к. этот потенциал даёт наиболее близкую к экспериментальной линию плавления льда. Молекулы метана и SDS описывались при помощи полноатомной модели OPLS-AA.

В ходе исследования было показано упорядочивающее влияние SDS на структуру молекул воды. Для этого были рассчитаны параметр порядка тетраэдричности ближнего порядка молекул воды  $F_3$  и параметр порядка межмолекулярных торсионных углов  $F_4$ . При этом не было выявлено значительной корреляции между упорядочением и концентрации ПАВ, что согласуется с экспериментальными данными, согласно которым достаточно даже небольшой концентрации SDS для ускорения процесса роста гидрата. Моделирование проводилось в зоне термодинамической стабильности гидратов метана (100 бар при 270 К), где рост гидрата возможен без присутствия ПАВ, однако в данном случае наблюдался менее упорядоченный рост газового гидрата, в то время как в системах с его присутствием расположение и тип полостей более соответствовал правильному гидратному соотношению числа больших и малых полостей. Также для сравнения влияния присутствия ПАВ было проведено моделирование системы при более низкой температуре и при более высоком давлении. Из-за малого размера системы нами не был рассмотрен случай спонтанного мицеллообразования.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-19-00428).*

## АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОВОЙ КОМФОРТНОСТИ МИКРОРАЙОНОВ

Дектерев Д.А.<sup>1,2</sup>, Литвинцев К.Ю.<sup>2</sup>, Мешкова В.Д.<sup>1</sup>, Дектерев Ар.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
пр. Свободный 79, Красноярск, 660041, Россия

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

Последнее время появляется множество работ, посвящённых численному моделированию аэродинамики городской застройки, в том числе с учётом ландшафта и метеорологических особенностей местности [1-3]. Работы затрагивают вопросы экологии, аэрации территории и пешеходной комфортности.

Как показывают исследования [4-6], даже обтекание геометрического объекта в виде куба, который можно рассматривать, как простейшую модель здания, сопровождается формированием нескольких сложных нестационарных трёхмерных вихревых структур. Корректность разрешения этих структур с помощью различных численных подходов рассматривается в работе [5]. Уже на этапе изучения аэродинамики куба, отмечаются недостатки стандартных RANS методов и преимущества метода LES.

Аэродинамика групп зданий, соответственно, будет обуславливаться взаимодействием множества вихревых структур, возникающих при обтекании каждого строения. Объекты исследования представляют собой достаточно масштабные и геометрические сложные модели, требующие хорошей сеточной разрешимости - это в свою очередь требует серьёзных вычислительных ресурсов. Применение LES моделирования в этих случаях становится сложным и дорогостоящим.

В данной работе приводятся результаты моделирования аэродинамики объекта в виде куба с применением различных подходов к моделированию турбулентности. Были рассмотрены стационарные и нестационарные RANS модели (SST, RSM), вихререшающие модели LES, а также гибридные модели на основе DES и PANS методов. Исследуется влияние детализации расчётной сетки и влияние уровня турбулентных пульсаций в набегающем потоке.

Результаты сопоставляются с данными, полученными в ходе экспериментального исследования аэродинамики кубов различного масштаба в аэродинамических установках с применением методов оптической диагностики потоков PIV и методов анемометрии, а также исследования давления на поверхности крупномасштабной модели куба в естественных ветровых условиях [7].

По результатам исследований показана принципиальная важность учёта параметров уровня турбулентных пульсаций набегающего потока. Даже на примере LES моделирования: длина аэродинамической тени за кубом при варьировании уровня турбулентных пульсаций от  $I = 1\%$  до  $I = 10\%$  изменяется более, чем в полтора раза, это хорошо видно на при-

мере линий тока (Рисунок 1). Координаты отнормированы по высоте куба  $H$ .

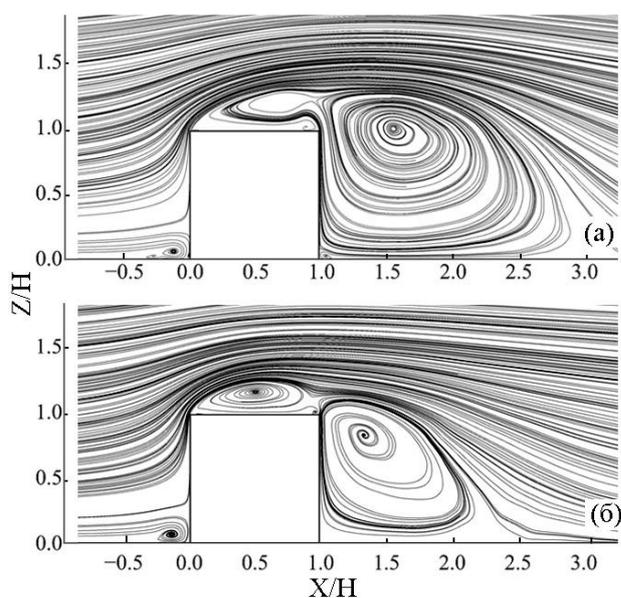


Рис. 1 - Линии тока (а -  $I=1\%$ ; б -  $I=10\%$ )

### Список литературы

1. Soo-Jin Park. Flow Characteristics Around Step-Up Street Canyons with Various Building Aspect Ratios / Soo-Jin Park, Jae-Jin Kim, Wonsik Choi, Eun-Ryoung Kim, Chang-Keun Song and et al. // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2020. – 174. – P 411– 431
2. Wei Xu. Numerical Study on Wind-Induced Noise of High-Rise Building Curtain Wall with Outside Shading Devices / Wei Xu, Feng Xu // *Hindawi Shock and Vibration*. – 2018. – 13 p.
3. Мешкова, В.Д. SigmaFlow как инструмент исследования ветрового комфорта в условиях городской среды / Мешкова В.Д., Дектерев А.А. и др. // *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. – 2022– 15. – 4. – 490-504. DOI: 10.17516/1999-494X-0398.
4. Martinuzzi, R.; Tropea, C. The Flow Around Surface-Mounted, Prismatic Obstacles Placed in a Fully Developed Channel Flow (Data Bank Contribution). *J. Fluids Eng.* 1993, 115, 85–92.
5. Rodi, W. Comparison of LES and RANS calculations of the flow around bluff bodies. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* 1997, 69, 55–75.
6. Pavlidis, C.L.; Palampigik, A.V.; Vasilopoulos, K.; Lekakis, I.C.; Sarris, I.E. Air Flow Study around Isolated Cubical Building in the City of Athens under Various Climate Conditions. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3410.
7. Richards, P.J.; Hoxey, R.P.; Short, L.J. Wind pressures on a 6m cu-be. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* 2001, 89, 1553–1564. doi.org/10.1016/S0167-6105(01)00139-8

*Исследование выполнено за счёт  
гранта Российского научного фонда  
№22-61-00098.*

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛАСТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ  
В ДВУМЕРНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ**

Долуденко А.Н.<sup>1</sup>, Денисенко В.В.<sup>2</sup>, Фортова С.В.<sup>2</sup>, Колоколов И.В.<sup>3</sup>, Лебедев В.В.<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Институт автоматизации проектирования РАН,  
ул. 2-я Брестская 19/18, Москва, 123056, Россия

<sup>3</sup> Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау, РАН  
142432 Черноголовка, Россия

Добавление полимерных молекул в вязкую среду сильно влияет на её гидродинамические свойства из-за растяжения полимерной молекулы, которое создает упругое напряжение, придавая полимерному раствору эластичность. Одним из существенных проявлений этого влияния является наблюдение режима эластической турбулентности [1]. Режим эластической турбулентности представляет из себя хаотическое течение, возникающее при низких значениях числа Рейнольдса  $Re \sim 1$  и больших значениях числа Вайсенберга  $Wi \gg 1$ , когда упругие силы растянутых полимерных молекул, влияющие на течение преобладают над силами инерции. Число Вайсенберга  $Wi = \frac{U}{\gamma_0 L}$  здесь определяется как произведение характерного градиента скорости на время релаксации полимерной молекулы  $1/\gamma_0$ .

Данная работа продолжает исследования, представленные в [2]. Последние два уравнения, описывающие динамику вектора растяжения полимерной молекулы  $\vec{R} = (R^x, R^y)$  в системе (1), решались численной методикой Курганова-Тедмора [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) &= 0, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho G \sin ky + \mu \Delta u + A \frac{\partial}{\partial x} [\gamma(R) \{R^x\}^2] + A \frac{\partial}{\partial y} (\gamma(R) R^x R^y), \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho G \sin kx + \mu \Delta v + A \frac{\partial}{\partial y} [\gamma(R) \{R^y\}^2] + A \frac{\partial}{\partial x} (\gamma(R) R^x R^y), \\ \frac{\partial (\frac{\rho \mathbf{V}^2}{2} + e)}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \mathbf{V} \left( \frac{\rho \mathbf{V}^2}{2} + p + e \right) \right) &= \frac{\partial}{\partial x} (\mu u \rho (\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y})) + A u \gamma(R) (R^x)^2 + \\ &+ v \mu \rho (\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}) + A v \gamma(R) R^x R^y + \frac{\partial}{\partial y} (\mu v \rho (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})) + A u \gamma(R) R^x R^y + \\ &+ \mu v \rho (\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x}) + A v \gamma(R) (R^y)^2 + u \rho G \sin ky + v \rho G \sin kx, \quad (1) \\ \frac{\partial R^x}{\partial t} + u \frac{\partial R^x}{\partial x} + v \frac{\partial R^x}{\partial y} - R^x \frac{\partial u}{\partial x} - R^y \frac{\partial u}{\partial y} + \gamma(R) R^x &= C_d \Delta R^x, \\ \frac{\partial R^y}{\partial t} + u \frac{\partial R^y}{\partial x} + v \frac{\partial R^y}{\partial y} - R^x \frac{\partial v}{\partial x} - R^y \frac{\partial v}{\partial y} + \gamma(R) R^y &= C_d \Delta R^y, \\ p &= \sigma p_e, \quad \sigma = \frac{2}{3}, \quad \gamma(R) = \gamma_0 (1 + \frac{R^2}{R_m^2}), \quad \mathbf{V} = (u, v)^T. \end{aligned}$$

Здесь  $A$  - концентрация полимеров в растворе,  $C_d$  - коэффициент искусственной диффузии полимеров, введенный для стабилизации численного решения,  $\gamma(R)$  - коэффициент релаксации полимерной молекулы,  $G$  - интенсивность внешней силы. Методика дает более устойчивые численные результаты в приграничных областях, где наблюдаются большие градиенты параметров течения [4]. В качестве модели упругости полимеров использована

$$\gamma(R) = \gamma_0 (1 + \frac{R^2}{R_m^2}),$$

позволяющая учесть взаимное

влияние полимеров и гидродинамического течения.

Исследовано течение в квадратной ячейке с внешней периодической силой, получен режим течения для задачи с периодическими граничными условиями при достаточно малых Рейнольдсах  $Re \sim 1 \div 10$ , и больших числах Вайсенберга  $Wi \sim 20 \div 70$ , являющийся режимом эластической турбулентности. Путём прямого численного моделирования, получен режим эластической турбулентности. Зависимость кинетической энергии от времени показывает переход от ламинарного течения к эластической турбулентности, когда зависимость становится хаотической (см. рис.1 - вертикальной чертой показан момент, когда ламинарное течение начинает переходить в турбулентное). Построены спектры скорости и кинетической энергии для гидродинамической составляющей течения. Наблюдается степенная зависимость с коэффициентом  $k \sim -3$ . Аналогичные спектры растяжений полимерных молекул демонстрируют зависимость  $k \sim -1$ .

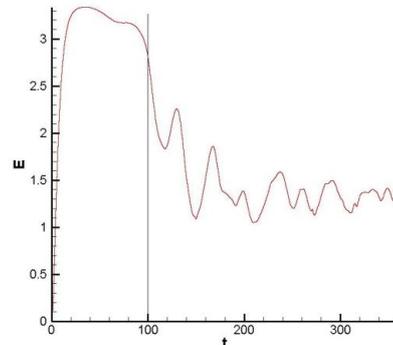


Рис.1. Зависимость кинетической энергии течения  $E$  полимерного раствора от времени  $t$ .

**Список литературы**

1. Victor Steinberg, Low Temperature Physics 2022, Vol. 48, No. 6, pp. 552–568.
2. Денисенко В. В., Фортова С. В. Численное моделирование эластической турбулентности в ограниченной двумерной ячейке. Сибирский Журнал Индустриальной Математики, Т. 26, №1(93), 2023, С. 55–64.
3. Alexander Kurganov and Eitan Tadmor, New High-Resolution Central Schemes for Nonlinear Conservation Laws and Convection–Diffusion Equations. Journal of Computational Physics 160, 241–282 (2000).
4. R. Sureshkumar and A. N. Beris, J. Non-Newtonian Fluid Mech. 60, 53 (1995).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект АААА-А19-119041590048-0)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКОАЛЕСЦЕНЦИИ РАЗНОИМЕННО ЗАРЯЖЕННЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ, ВЗВЕШЕННЫХ В СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Елагин И.А., Карчевская А.С., Чирков В.А.

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб. 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

Процесс электрокоалесценции привлёк к себе внимание благодаря своей важности в различных областях, в частности, как один из наиболее эффективных способов очистки нефти от микрокапель воды. Для проектирования электродегидраторов и определения наиболее эффективных режимов его работы важно понимать, каким образом происходит объединение капель и какие параметры могут повлиять на процесс очистки.

В данной работе изучается влияние заряда на двух проводящих каплях, взвешенных в слабопроводящей жидкости при постоянном напряжении, на их коалесценцию. Цель данного исследования — обеспечить понимание того, как наличие ненулевого заряда на каплях влияет на электрокоалесценцию, включая процессы сближения капель, их объединения и распыления, а также определить диапазон возможных (реалистичных) значений заряда капель, которые могут возникнуть в процессе электростатической очистки. Предполагается, что капли сохраняют свой заряд во время движения (т.е. не учитывается диссипация заряда из-за конечной электрической проводимости масла).

Для достижения поставленной цели исследование проводилось с помощью численного конечно-элементного моделирования в COMSOL Multiphysics. Для описания двухфазных сред использовался производный лагранжево-эйлеров метод. Этот метод не имеет диффузионной границы раздела, поэтому он может точно описывать изменения свойств жидкости на этой границе.

Математическая модель, которая ранее была проверена экспериментально в случае незаряженных капель, включает в себя уравнения Навье — Стокса для несжимаемой среды и электростатические уравнения [1, 2].

Как наиболее вероятный в данной работе был рассмотрен процесс взаимодействия разноименно заряженных капель, и варьировались радиусы капель, величины заряда и внешнего электрического поля. Исследование проводилось на примере эмульсии «дистиллированная вода – оливковое масло». Моделирование проходило в два этапа: сначала рассчитывались деформация и сближение заряженных капель, затем изменялась топология модели для образования «перемычки» между каплями и рассчитывалось их дальнейшее взаимодействие. Было выделено три типовых исхода сближения капель: коалесценция, декоалесценция с образованием двух больших капель и маленькой капли между ними и декоалесценция с распылением множества мельчайших капель.

Для того, чтобы численно оценить диапазон зарядов, которые могут возникнуть на поверхности капли, были рассмотрены три основных случая: распределение зарядов после декоалесценции капель; распределение заряда в результате контакта капель с

электродом; заряд капель от неравновесных диссоциационно-рекомбинационных заряженных слоев. В первых двух случаях было проведено моделирование для различных значений радиуса капель в упрощенной постановке, где учитывались только электростатические уравнения. Полученные значения зарядов были сопоставлены с результатами полной модели и значениями заряда, полученными в работе [3]. Таким образом, было выяснено, что характерный порядок значений заряда на каплях с радиусом 1 мм составляет 0,1 нКл.

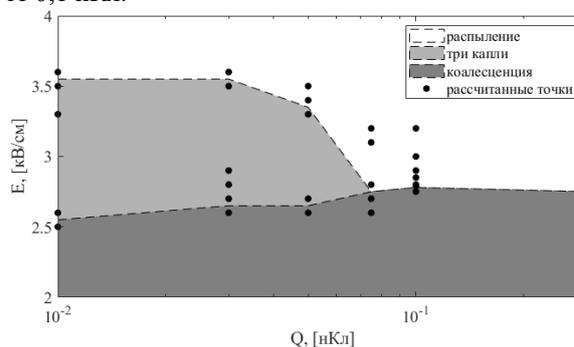


Рис. 1. Карта режимов для капель радиусом 1 мм.

Было установлено, что заряд оказывает существенное влияние на процессы сближения, коалесценции и декоалесценции капель. На рис. 1 приведена карта режимов для капель радиусом 1 мм, заряженных одинаковым по модулю, но разноименным зарядом. Оказалось, что пороговое значение напряженности поля для перехода от исхода с коалесценцией к исходу с декоалесценцией повышается на 13% при увеличении заряда до значения 0,75 нКл и затем практически не изменяется в рассматриваемом диапазоне зарядов. Кроме того, для зарядов больших, чем 0,75 нКл, не наблюдается декоалесценции с образованием трёх капель: при превышении порогового значения напряженности поля капли при взаимодействии распыляются.

### Список литературы

1. G. O. Utiugov, V. A. Chirkov, and I. A. Dobrovolskii, "The Experimental Verification of Electrodeformation and Electrocoalescence Numerical Simulation Based on the Arbitrary Lagrangian–Eulerian Method," in 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD), 2020, pp. 529–532.
2. G. Utiugov, V. Chirkov, and M. Reznikova, "Application of the arbitrary Lagrangian-Eulerian method to simulate electrical coalescence and its experimental verification," *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 2, p. e02009, 2021.
3. I. Dobrovolskii and V. Chirkov, "Dissociation-recombination Charging of Conducting Droplet Suspended in a Dielectric Liquid with Unequal Ion Mobilities," 2022 IEEE 21st International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Sevilla, Spain, 2022, pp. 1–4.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-79-10078).

**ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОГО НАГРЕВА  
ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА****Журавлев Д.В., Васильков С.А., Чирков В.А., Елагин И.А.**Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб. 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

Литий-ионные аккумуляторы получили широкое распространение в качестве источника энергии в самых различных электротехнических устройствах. Актуальной задачей является корректный и ресурсо-экономный расчёт тепловых процессов, происходящих в аккумуляторе, так как критический перегрев способен вывести его из строя. Этот расчёт осложнён тем, что геометрические размеры всего аккумулятора могут составлять десятки сантиметров, а электрохимические процессы происходят на масштабах частиц размером в несколько микрометров, из которых выполняются пористые электроды аккумулятора.

Численное моделирование работы и нагрева литий-ионного аккумулятора проводится при помощи метода конечных элементов [1-3]. Для описания электрохимической подсистемы аккумулятора используется теория пористого электрода [1], которая позволяет проводить моделирование на масштабе одной элементарной электрохимической ячейки электрод-сепаратор-электрод (с характерным размером около 200 мкм), но не рассматривая конкретную геометрию частиц пористых электродов и пор между ними. Существует также расширение данной модели, которое описывает мощности тепловыделения в аккумуляторе, связанные с электрохимическими реакциями и токопрохождением [2].

Однако использование этой теории всё ещё не позволяет проводить прямой расчёт аккумулятора, который может содержать множество элементарных ячеек.

Для разрешения данной проблемы существует подход, когда электрохимическая подсистема рассчитывается в одномерной постановке на основе теории пористого электрода, а для тепловой подсистемы используется отдельная трёхмерная геометрия [3]. Связь осуществляется следующим образом: из 1D в 3D части модели передаётся объёмная мощность всех источников тепловыделения, а из 3D в 1D часть модели передаётся средняя температура аккумуляторных ячеек.

Однако у данного метода существует недостаток. Работа литий-ионного аккумулятора зависит от температуры, так как она влияет на протекание электрохимической реакции, диффузию лития и электропроводность материалов. Соответственно, если температура различных частей аккумулятора будет отличаться, то и функционировать они будут по-разному. Остаётся неясным, насколько точным тогда является использование единой средней температуры в электрохимической части модели.

Данная работа нацелена на создание совместной электрохимической и тепловой модели литий-

ионного аккумулятора, учитывающей неоднородность распределения температуры.

Для учёта неоднородности распределения температуры произведено усовершенствование описанного выше подхода. 3D геометрия тепловой части модели разбита на несколько подобластей (зон). Каждой зоне при этом сопоставлена собственная электрохимическая 1D часть, моделирующая работу аккумулятора при средней температуре данной зоны. Варьирование количества зон позволяет контролировать точность, с которой учитывается неоднородность температуры. При этом все 1D части модели электрически соединены параллельно.

Чтобы лучше учитывать неоднородность распределения температуры при заданном числе разбиений, следует разделять зоны так, чтобы внутри каждой температура была примерно одинаковой, а средние температуры зон отличались. Для этого предложен следующий итеративный подход. Сначала рассчитывается задача без разбиения на зоны, получается начальное распределение температуры. Затем производится разбиение на зоны по контурам температур и рассчитывается новая задача. При необходимости проводятся дополнительные итерации разбиения на зоны или увеличивается их число.

Предложенный подход к созданию численной модели литий-ионного аккумулятора позволяет рассчитать работу и нагрев батареи. При этом электрохимическая часть модели реализована в 1D постановке, что обеспечивает одновременно и экономии вычислительных ресурсов, и точность. При помощи разбиения 3D геометрии тепловой части модели на зоны можно учитывать неоднородность распределения температуры. Так как разбиение основывается на распределении температуры, полученном из модели с одной зоной, то можно определить, насколько важным является учёт неоднородности температуры в конкретной задаче: достаточно ли ограничиться более простой моделью или требуется дальнейшее разбиение на большее число зон.

**Список литературы**

1. Doyle M., Fuller T.F., Newman J. Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge // J. Electrochem. Soc. 1993. V. 140, N 6. P. 1526–1533.
2. Gu W.B., Wang C.Y. Thermal-Electrochemical Modeling of Battery Systems // J. Electrochem. Soc. 2000. V. 147, N 8. P. 2910–2922.
3. Jiang G., Zhuang L., Hu Q., Liu Z., Huang, J. An investigation of heat transfer and capacity fade in a prismatic Li-ion battery based on an electrochemical-thermal coupling model // Applied Thermal Engineering 2020. V. 171, 115080.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ВОЗДУШНОЙ ФАЗЫ НА РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНОЙ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Платонов Д.В.<sup>1,2</sup>, Сентябов А.В.<sup>1,2</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup>, Шторк С.И.<sup>1</sup>, Скрипкин С.Г.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет,  
пр. Свободный, д. 79, Красноярск, 660074, Россия

Закрученные течения достаточно широко распространены в природе и технике. Одним из наиболее характерных примеров закрученных потоков в технических приложениях - это течения в проточном тракте гидротурбины высоконапорной ГЭС. Одной из основных проблем в данном случае являются нестационарные явления, связанные с образованием крупномасштабных вихревых структур, формирующихся в пространстве за рабочим колесом гидроагрегата. Вихревая структура, формирующаяся в данном случае очень разнообразна и неустойчива. Прецессия вихревого ядра в проточном тракте гидротурбины является негативным явлением, поскольку вызывает низкочастотные пульсации давления во всем проточном тракте. Данные пульсации представляют серьезную опасность для гидротурбинного оборудования в связи с мощными пульсациями потока, которые приводят к сильным вибрациям конструкции гидротурбины и в случае резонанса могут привести к разрушению оборудования. Одним из методов борьбы с прецессией вихревого ядра, является подача воздуха в проточный тракт.

В данной работе планируется провести исследования влияния подачи воздуха на вихревую структуру течения на примере закрученного потока в модельной тангенциальной камере (рисунок 1).

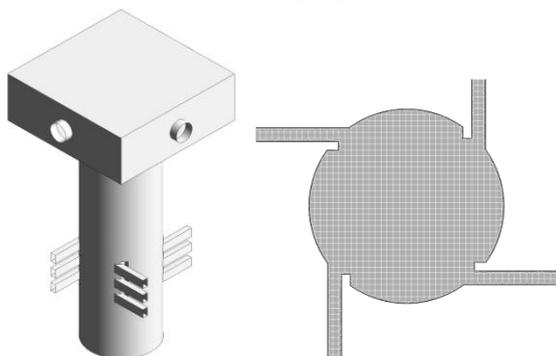


Рис. 1. Геометрия и расчётная сетка тангенциальной камеры

Динамика спиральных вихрей широко изучается экспериментальными [1-3], численными и даже аналитическими методами, однако расчётных исследований течения в тангенциальной вихревой камере практически не встречается. Особенно сложным для численного моделирования представляются такие

режимы, как формирование двухспиральной вихревой структуры (рисунок 2).

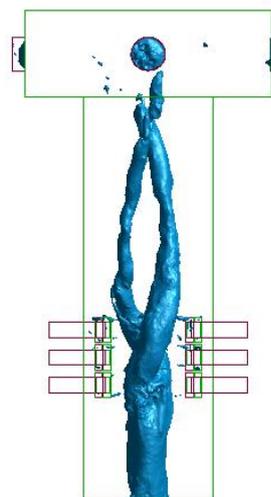


Рис. 2. Вихревая структура

При помощи подачи воздуха в поток предполагается управлять структурой течения в камере, переход от двухспиральной структуры к односпиральному вихрю и обратно.

Так же планируется исследовать влияния подачи различной дисперсности и объёмной доли воздуха на структуру течения и пульсации давления в тангенциальной камере.

### Список литературы

1. Alekseenko S.V., Kuibin P.A. and Okulov V.L. Theory of concentrated vortices. An introduction. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007.
2. Dremov S.V., Shtork S.I., Skripkin S.G., and Kabardin I.K. An experimental investigation of the interaction between a pair of precessing vortices in a tangential vortex chamber. Journal of Physics: Conference Series 754 (2016) 022003. doi:10.1088/1742-6596/754/2/022003
3. Skripkin S.G., Dremov S.V., and Shtork S.I. Applying phase averaging technique to analysis of unsteady twin vortex structure observed in tangential vortex chamber. Journal of Physics: Conference Series 1382 (2019) 012042. doi:10.1088/1742-6596/1382/1/012042

Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-19-00769).

## ОБ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХОДИМОСТИ СХЕМ СКВОЗНОГО СЧЁТА ПРИ РАСЧЁТЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН

Остапенко В.В., Полунина Е.И., Хандеева Н.А.

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

Проведён сравнительный анализ точности немо-  
нотонных численных схем RBM (Rusanov-Burstein-  
Mirin) [1,2], CWA (Compact high order Weak  
Approximation) [3] и монотонной схемы A-WENO  
(Alternative Weighted Essentially Non-Oscillatory) [4]  
при расчёте газодинамических ударных волн.

Система уравнений неизэнтропической газовой  
динамики имеет вид

$$\mathbf{u}_t + \mathbf{f}(\mathbf{u})_x = 0,$$

$$\mathbf{u} = (\rho, \rho u, \rho e)^T, \mathbf{f}(\mathbf{u}) = (\rho u, \rho u^2 + p, \rho(u e + p))^T,$$

где  $\rho, u, p, e = \varepsilon + u^2/2$  – плотность, скорость, давление и  
удельная полная энергия,  $\varepsilon$  – удельная внутренняя  
энергия. Давление и внутренняя энергия удовлетво-  
ряют уравнению состояния идеального политропного  
газа  $p = (\gamma - 1)\rho e$ , в котором  $\gamma = 1.4$ . Рассмотрим для этой  
системы задачу Коши со следующими периодиче-  
скими начальными данными

$$w_1(x, 0) = -10, \quad w_2(x, 0) = 0,$$

$$w_3(x, 0) = \sin(2\pi(x+3)/X + \pi/4) + X, \quad X = 10,$$

изэнтропических квазиинвариантов

$$w_1 = u - 2c/(\gamma - 1), \quad w_3 = u + 2c/(\gamma - 1)$$

и энтропии газа

$$w_2 = s = \ln(p/\rho^\gamma)/(\gamma - 1)$$

где  $c = \sqrt{\gamma p/\rho}$  – скорость звука в газе. Для данной  
задачи будем использовать аббревиатуру PCPG  
(Periodic Cauchy Problem for Gas dynamics).

В точном решении задачи PCPG в момент време-  
ни  $t_* \approx 2.7$  в результате градиентных катастроф фор-  
мируется последовательность ударных волн, которые  
распространяются друг за другом с одинаковыми  
скоростями в положительном направлении оси  $x$ .  
Было показано, что при расчёте задачи PCPG в глад-  
ких частях точного решения вне областей влияния  
ударных волн схема CWA имеет приблизительно на  
порядок более низкую точность, чем схема A-WENO,  
и на порядок более высокую точность, чем схема  
RBM. В то же время внутри областей влияния удар-  
ных волн точность схемы A-WENO резко падает и  
становится существенно более низкой, чем точность  
схем RBM и CWA.

Для обоснования повышенной точности схем  
RBM и CWA в областях влияния ударных волн ис-  
следована интегральная сходимость численных ре-  
шений в прямоугольных областях

$$\Pi(T) = \{(x, t) : x \in [0, X/2], t \in [0, T]\}.$$

На рис. 1 приведены порядки интегральной сходимо-  
сти в этих областях, определяемые по формулам

$$R(T) = \log_{1/2} \frac{J_{h2}(T) - J_{h3}(T)}{J_{h1}(T) - J_{h2}(T)},$$

$$J_{hi}(T) = \int_0^T V_{hi}(t) dt, \quad V_{hi}(a, b, t_n^i) = \int_0^{X/2} v_{hi}(x, t_n^i) dx$$

и относительные дисбалансы вычисления интегралов  
 $J_h(T)$ , определяемые по формуле

$$\Delta J_h(T) = \lg \frac{|\delta J_h(T)|}{|J_h(T)|}.$$

Из рис. 1 следует, что при  $T < t_*$ , т.е. до формиро-  
вания ударных волн, для всех трёх схем порядки ин-  
тегральной сходимости  $R(T) \approx 3$ , что соответствует  
точности этих схем на гладких решениях. В то же  
время, при  $T > t_*$  т.е. после возникновения ударных  
волн эти порядки резко падают: для A-WENO схемы  
 $R(T) \approx 1$ , а для схем RBM и CWA чередуются вре-  
менные интервалы приблизительно второго и перво-  
го порядков интегральной сходимости, чем объясня-  
ется более высокая точность этих схем (по сравне-  
нию со схемой A-WENO) в областях влияния удар-  
ных волн, а также их более высокая точность при вы-  
числении интегралов  $J_h(T)$ .

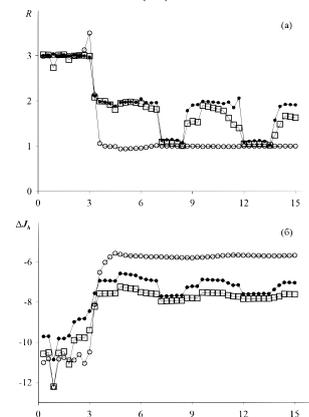


Рис. 1. Интегральные порядки сходимости (а), и относи-  
тельные дисбалансы (б), получаемые при вычислении инте-  
гралов  $J_h(T)$  по схемам RBM (точки), CWA (квадратики)  
и A-WENO (кружки).

### Список литературы

1. Русанов В.В. Разностные схемы третьего порядка точности для сквозного счёта разрывных решений // Докл. АН СССР. 1968. Т. 180. № 6. С. 1303—1305.
2. Burstein S.Z., Mirin A.A. Third order difference methods for hyperbolic equations // J. Comput. Phys. 1970. V. 5. N. 3. P. 547-571. doi:10.1016/0021-9991(70)90080-X
3. Остапенко В.В. О построении разностных схем повышенной точности для сквозного расчёта нестационарных ударных волн // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2000. Т. 40. № 12. С. 1857-1874.
4. Wang B.-S., Don W.S., Kurganov A., Liu Y. Fifth-order A-WENO schemes based on the adaptive diffusion central-upwind Rankine-Hugoniot fluxes // Commun. Appl. Math. Comput. 2021. doi:10.1007/s42967-021-00161-2

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-11-00060).

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

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

Широко используемые RANS модели турбулентности в инженерных расчётных кодах [1] плохо приспособлены для численного моделирования потоков с низкими числами Прандтля, характерных для жидких металлов, и дают существенное отклонение предсказания средней температуры от реальной для таких течений [2]. Особенностью численного моделирования течений с низкими числами Прандтля является описание турбулентности и учёт переноса тепла, как за счёт конвективного перемешивания потока, так и за счёт молекулярной теплопроводности самого теплоносителя. Причём вклад в изменение температуры теплоносителя за счёт высокой теплопроводности может быть не меньше, чем изменение температуры за счёт турбулентного перемешивания. В современных моделях для замыкания уравнения энергии используется гипотеза градиентной турбулентной диффузии с турбулентной теплопроводностью в виде отношения турбулентной вязкости к постоянному турбулентному числу Прандтля  $Pr_t = 0,85$ :

$$-\overline{u'_i c'} \approx \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} = D_t \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \quad (GDH),$$

однако это предположение работает в случае, когда процесс турбулентного переноса тепла аналогичен переносу импульса, что нарушается для течений с малым числом Прандтля.

В данной работе рассматривается более общий вид для турбулентного потока тепла:

$$-\overline{u'_i c'} \approx \left[ \nu_t \sum_{n=1}^6 g^{(n)}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{15}) T_{ij}^{(n)} \right] \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j},$$

где  $g^{(n)}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{15})$  - произвольные функции от инвариантов и  $T_{ij}^{(n)}$  - тензорный базис градиента скорости. Используя за основу нейросетевую модель TBNNs предложенную в работе [3], оцениваются функции  $g^{(n)}$  путем обучения коэффициентов нейронной сети для аппроксимации турбулентного потока тепла на высокоточных DNS данных. Обучение параметров нейросетевых моделей в данной работе выполнялось на данных турбулентного потока с теплообменом в плоском канале для разных чисел  $Re$  и  $Pr$  [4]. На рис. 1 показан пример предсказания продольной компоненты потока тепла вблизи стенки канала для  $Re_\tau = 640$  и малого числа Прандтля  $Pr = 0,025$  (не использовались для обучения) подходом на основе машинного обучения (RANS+ML) в сравнении с DNS данными и базовой RANS моделью и соответствующие профили безразмерной температуры. Дополнительно на профиле средней температуры представлен результат модифицированной линейной

градиентной модели (RANSm) [5]:

$$Pr_t = 0.85 + 0.7 \frac{\nu/v_t}{Pr}.$$

Видно, что подход с калибровкой методом машинного обучения улучшает предсказание температуры относительно базовой RANS модели и работает лучше RANSm вдали от стенки.

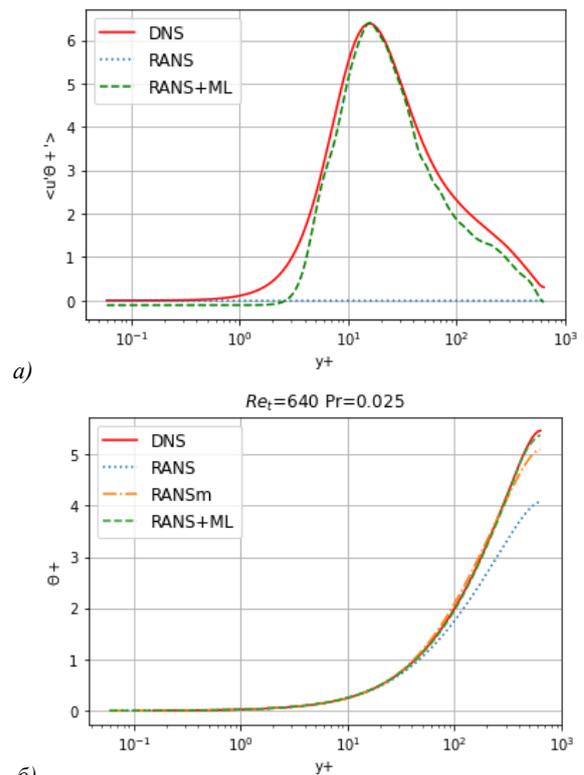


Рис. 1 Сравнение профилей а) продольной компоненты турбулентного потока тепла и б) безразмерной температуры для DNS, RANS(GDH) и модификаций RANS

#### Список литературы

1. Моделирование турбулентных течений / Белов И.А., Исаев С.А. Учеб. пособ. СПб.: Балт. гос. техн. Ун-т, 2001. 108 с.
2. Козелков, А. С., Куркин А. А., Курулин В. В., Легчанов М. А., Тятюшкина Е. С., Циберева Ю. А. Исследование применения RANS-моделей турбулентности для расчета неизотермических течений с низкими числами Прандтля // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2015. № 4. С. 44-58.
3. Milani P.M., Ling J., Eaton J.K. Turbulent scalar flux in inclined jets in crossflow: counter gradient transport and deep learning modelling // Journal of Fluid Mechanics. 2021. V. 906.: A27.
4. Abe H., Kawamura H. Matsuo Y. Direct numerical simulation of a fully developed turbulent channel flow with respect to Reynolds number dependence // Trans. ASME J. Fluids Eng. 2001. Vol. 123, P. 382-393.
5. Kays W. M. Turbulent Prandtl number. Where are we? // ASME Journal of Heat Transfer. 1994. V. 116(2), P. 284-295.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-19-00587).

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА НАПЛАВКИ КЛИНОВЫХ ПАЗОВ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Бирюков М.И.<sup>1</sup>, Шалимов Ю.Н.<sup>2</sup>, Хвостов А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО НПФ "Измерон-В",

пр. Труда, 111, Воронеж, 394019, Россия

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет,

ул. 20-летия Октября, 84, Воронеж, 394006, Россия

В процессе эксплуатации сварных рам тележек железнодорожного подвижного состава происходит релаксация сварных напряжений и под действием силовых нагрузок рама деформируется. Наиболее ответственным конструктивным элементом рамы тележки (рис. 1) являются клиновые пазы, через которые передаются тяговые усилия от двигателя железнодорожному составу. Отклонения формы и расположения клиновых пазов ведет к неправильному положению колесных пар и их повышенному износу. В связи с этим возникает необходимость своевременного контроля размеров формы и расположения клиновых пазов и при необходимости выполнения восстановительного ремонта, например, наплавки сварным электродом изношенных поверхностей пазов и последующей фрезеровки в номинальные размеры.

При восстановлении в процессе нагрева происходит изменение структуры вещества, которое может привести к потере его прочностных свойств. Для прогнозирования нарушения температурного режима в ходе обработки изделия необходима математическая модель температурных полей, возникающих в процессе нагрева.

Рассмотрена задача нестационарного нагрева области источником теплового потока постоянной мощности  $Q$ , перемещающегося со скоростью  $\mathbf{u}$  по восстанавливаемой поверхности  $\Omega_2$  (рис. 1). На основании  $\Omega_3$  задано условие симметрии, а на границах  $\Omega_1$  условие конвективного теплообмена, изменение геометрии вследствие наплавки не учитывается.

Математическая модель включает в себя уравнение сохранения энергии

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \tilde{Q}(x, y, z, t), \quad (1)$$

где  $t$  – время, с;  $\rho$  – плотность, кг/К;  $c_p$  – изобарная удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $\tilde{Q}(x, y, z, t)$  – удельная мощность теплового потока, Вт/м<sup>3</sup>.

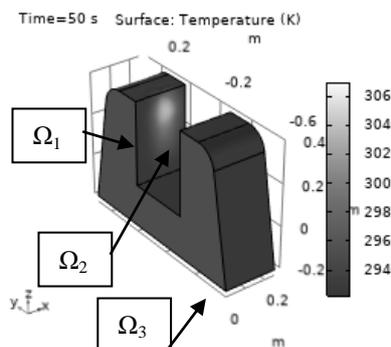


Рис. 1 Расчётная схема клинового паза

Распределение удельной мощности источника тепла для сварки в месте контакта аппроксимировано нормальным распределением [2] и записано в виде

$$\tilde{Q}(r) = q_{\max} e^{-kr^2}, \quad (2)$$

где  $q_{\max}$  – наибольший удельный тепловой поток в центре пятна нагрева, Вт/м<sup>3</sup>;  $k$  – коэффициент сосредоточенности удельного потока дуги, 1/м<sup>2</sup>;  $r$  – расстояние от оси источника, м.

Граничные условия на  $\Omega_3$   $\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0$ , где  $\mathbf{n}$  – единичный вектор нормальный к поверхности; на  $\Omega_1, \Omega_2$   $\alpha(T_{\text{окр}} - T) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}}$ , где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности изделия к окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Удельная мощность теплового потока будет функцией как координат, так и времени. При этом координата  $y$  постоянна и равна высоте изделия

$$\tilde{Q}(x, y, z, t) = q_{\max} e^{-k \left[ (x-x_r(t))^2 + (z-z_r(t))^2 + (y-y_r(t))^2 \right]}, \quad (3)$$

$x_r, y_r, z_r$  – программируемые координаты сварного пятна контакта.

Система (1-3), включая граничные условия, представляет собой математическую модель динамики температурного поля в изделии с подвижным источником тепловой энергии на одной из его поверхностей.

Решение задачи осуществляется численно с использованием метода конечных элементов в пакете *Comsol Multiphysics*. Задаваясь значениями  $q_{\max}, k$ , теплофизическими свойствами материала и законом изменения координаты центра источника тепловой энергии проводятся вычисления. Результатом расчётов являются скалярные нестационарные температурные поля (рис. 1). Как видно из рис. 1 расчётные температурные поля отражают локализацию нагретых областей изделия в динамике.

Разработанная модель позволила имитировать различные режимы наплавки в ходе вычислительных экспериментов, характеризующиеся мощностью теплового потока и траекторией перемещения сварочного электрода, а также идентифицировать рациональные пространственно-временные параметры режима наплавки.

### Список литературы

1. Теория сварочных процессов Фролов В.В. (ред.), Волченко В.Н., Ямпольский В.М., Винокуров В.А., Парахин В.А., Ермолаева В.И., Макаров Э.Л., Григорьянц А.Г., Гаврилюк В.С., Шип В.В. Высшая школа. Москва, 1988. - 559 с.
2. Медведев, А.Ю. Расчет температурных полей при сварке и наплавке: Учебное пособие / А. Ю. Медведев; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2009. – 142 с.

## ДВУХЖИДКОСТНОЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ МИШЕНИ ИЗ ФТОРИДА ЛИТИЯ РЕНТГЕНОВСКИМ ЛАЗЕРОМ

Шепелев В.В.<sup>1</sup>, Чупров П.А.<sup>1</sup>, Иногамов Н.А.<sup>2</sup>, Жаховский В.В.<sup>3</sup>, Фортова С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматизации проектирования РАН,  
2ая Брестская 19/18, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН,  
пр. Академика Семенова 1А, Московская обл., г. Черноголовка, Россия

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова,  
Сушевская ул. 22, Москва, Россия

Рентгеновские лазеры резко отличаются от лазеров оптического диапазона гораздо меньшей длиной волны. Для рассматриваемого нами случая жёсткого рентгена с энергией фотона 10 кэВ длина волны имеет порядок одного ангстрема. Это обстоятельство даёт возможность применять рентгеновские лазеры для получения изображений атомных и молекулярных структур очень высокой точности, в таких областях, как медицина, микроэлектроника, микробиология. Помимо этого, возможно использование рентгеновских лазерных технологий в разработке оптических систем для самых разных промышленных задач, таких как фотолитография.

Рассматривается задача об облучении объёмной мишени из фторида лития (LiF) узким пучком жесткого рентгеновского лазера с импульсом фемтосекундной длительности. Энергия излучения составляет около 2 мДж, длительность импульса 40 фс (1 фс =  $10^{-15}$  с). Параметры экспериментальной установки соответствуют экспериментам [1].

С помощью разработанной ранее и зарекомендовавшей себя одномерной гидродинамической модели [2, 3], основанной на уравнениях движения идеальной среды в массовых лагранжевых переменных производится первичное численное исследование задачи. Модель использует полуэмпирическое уравнение состояния (УРС) фторида лития в форме Ми-Грюнайзена. Референсные кривые УРС строятся на основе ударно-волновых экспериментов из базы rusbank [4].

Основная проблема, возникающая при гидродинамическом моделировании эффектов облучения вещества мощными лазерными импульсами, состоит в корректном разрешении контактной границы между облучаемым веществом и внешней средой.

В настоящей работе эта проблема решается с помощью гидродинамической многофазной модели, основанной на системе гиперболических уравнений Баера-Нунциато (БН) [5, 6]. Учёт наличия нескольких фаз в объёме позволяет отслеживать контактную границу без необходимости явного отслеживания фронта на каждом шаге, а также упрощает моделирование области, заполненной внешней средой, т.е. воздухом или вакуумом.

Другой трудностью при моделировании области лазерного факела является учёт растягивающих напряжений в металле, возникающих при кавитационных и откольных явлениях. Обычный сквозной счёт

без учёта откольных моделей приводит к акустической катастрофе, когда на некоторой глубине в веществе мишени квадрат скорости звука становится отрицательным в связи с пересечением траектории вещества на фазовой диаграмме с границей области метастабильных состояний. Предложенная модель использует оригинальный вариант метода релаксации давления, стабилизирующий решение в областях взаимопроникновения фаз.

С помощью модели БН, откалиброванной на основе расчётов по лагранжевой гидродинамической модели, моделируется распространение и затухание начального профиля нагрева в веществе мишени. Выделяются стадии (1) формирования канала в веществе вследствие большой глубины прогрева лазером, и (2) возникновения из нагретого вещества мишени пробки, закупоривающей верхнюю часть канала через несколько десятков пикосекунд (1 пс =  $10^{-12}$  с) после облучения. Определяются время формирования пробки и ширина канала.

### Список литературы

1. Makarov, S., Makita, M., Nakatsutsumi, M., Pikuz, T., Ozaki, N., Preston, T. R., Appel, K., Konopkova, Z., Cerantola, V., Brambrink, E., Schwinkendorf, J.-P., Mohacsi, I., Burian, T., Chalupsky, J., Hajkova, V., Juha, L., Vozda, V., Nagler, B., Zastra, U. & Pikuz, S. (2023). J. Synchrotron Rad. 30, 208-216.
2. N.A. Inogamov, S.I. Ashitkov, V.V. Zhakhovskii, V.V. Shepelev, V.A. Khokhlov, P.S. Komarov, M.B. Agranat, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, Acoustic probing of two-temperature relaxation initiated by action of ultrashort laser pulse, Appl. Phys. A 101(1).
3. N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskii, S.I. Ashitkov, V.A. Khokhlov, V.V. Shepelev, P.S. Komarov, A.V. Ovchinnikov, D.S. Sitnikov, Yu.V. Petrov, M.B. Agranat, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, Laser acoustic probing of two-temperature zone created by femtosecond pulse, Contrib. Plasma Phys., 51(4), 367-374 (2011)
4. База данных ударно-волновых экспериментов / ОИВТ РАН. URL: <http://www.ihed.ras.ru/rusbank>.
5. Baer, M.R and J.W. Nunziato. 1986. A two-phase mixture theory for the deflagration-to-detonation transition in reactive granular materials. International Journal of Multiphase Flow. 12(6):861-889. doi: 10.1016/0301-9322(86)90033-9.
6. Poroshyna Y.E., Utkin P.S. Numerical simulation of a normally incident shock wave-dense particles layer interaction using the Godunov solver for the Baer-Nunziato equations // International Journal of Multiphase Flow. 2021. V. 142. Paper 103718

*Работа выполнена в рамках госзадания ИАП РАН  
(В.В. Шепелев, П.А. Чупров, С.В. Фортова)  
и госзадания ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН  
(Н.А. Иногамов).*





## СЕКЦИЯ 7

Методы и средства теплофизического  
и гидрогазодинамического эксперимента





## РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ ВЫСОТНЫХ УСЛОВИЙ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Головатюк А.С., Бердов Р.Д., Нефедова В.В.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации  
«Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»,  
ул. Онежская 8, Москва, 125438, Россия

В процессе работы двигательных установок систем аварийного спасения, входящих в состав ракетоносителей, возможно натекание высокотемпературных продуктов сгорания (ПС) на элементы конструкции. Материалы внешней тепловой защиты эксплуатируются в условиях воздействия на них высокотемпературного потока ПС при малых значениях давления окружающей среды. В настоящее время в ракетно-космической технике в качестве теплозащитных покрытий (ТЗП) широкое применение находят материалы, которые способны поглощать тепло за счёт физико-химических превращений и разложения поверхностного слоя или разложением отдельного компонента материала при обеспечении благоприятного теплового режима внутренних слоёв. Механизмы термодеструкции большинства используемых на практике теплозащитных материалов (ТЗМ), омываемых высокотемпературными и (или) высокоскоростными газовыми потоками, в достаточной степени сложны, поэтому применение их расчётно-теоретического описания в нестационарных задачах теплопроводности сопряжено со значительными трудностями, и в большинстве задач невозможно без уточнения для рассматриваемых условий задачи определяющих термодеструкцию характеристик, например эффективных кинетических констант, эффективной энтальпии разрушения и времени выхода на квазистационарный режим разрушения, или другого комплекса параметров. Следствием этого является широкое применение в инженерной практике подходов к описанию процесса уноса массы ТЗМ, основанных на экспериментальных данных. Как было сказано ранее, эксплуатация рассматриваемых ТЗП происходит при существенном разрежении. Соответственно, в процессе эксперимента необходимо моделировать данные условия. Имитация высотных условий – распространенная задача при испытании ракетных двигателей (РД). Одним из методов воссоздания высотных условий является применение газодинамической трубы (ГДТ), которая представляет из себя проточный тракт, диаметр которого несколько превышает диаметр выходного сечения сопла РД. В процессе работы РД и истечения ПС через ГДТ в проточном тракте за счёт явления эжекции реализуется давление значительно ниже атмосферного. Таким образом, для имитации высотных условий при испытании ТЗП предлагается использовать ГДТ, так как данный способ позволит моделировать параметры обтекания исследуемых образцов материалов приближенные к натурным.

Целью данной работы является разработка методов расчётно-экспериментального определения термоэрозионной стойкости материалов ТЗП при имита-

ции высотных условий и обтекании ПС натуральных топлив.

Объектом настоящего исследования являются ТЗМ двух классов: напыляемое отверждаемое резиноподобное покрытие и композиционный материал на основе углеродных волокон, пропитанный эпоксидным связующим. Экспериментальное исследование выполнено на малогабаритной установке, включающую в себя твёрдотопливный газогенератор и ГДТ. Данная установка позволяет воссоздавать условия теплообмена максимально приближенные к натурным: один уровень величин воздействующего удельного теплового потока и значений давления потока, сам поток формируется ПС натуральных топлив. Образцы ТЗМ располагались на внутренней поверхности проточного тракта на различном расстоянии от выходного сечения сопла. Расстояние определялось из условия обеспечения параметров процесса теплообмена на поверхности образцов приближенных к натурным: величина удельного теплового потока –  $0,8 \text{ МВт/м}^2$ ; величина окружающего давления –  $7 \text{ кПа}$ . Значения плотности теплового потока и давления первоначально были определены расчётным путем, а в последствии подтверждены в ходе предварительного испытания.

По результатам измерений исходной и конечной массы и длины образца определялся общий унос массы материала. По техническим причинам в полной мере воспроизвести эксплуатационные нагрузки на образцы ТЗП не представилось возможным. Время воздействия высокотемпературных ПС на материал в натуральных условиях составляет порядка  $10 \text{ с}$ , однако, в процессе стендовых испытаний время воздействия на образцы составило  $3 - 3,5 \text{ с}$ . Для обеспечения возможности переноса данных по деструкции материалов, полученных в ходе стендовых испытаний, на натурные условия эксплуатации обработка экспериментальных данных была проведена с использованием такой величины как эффективная энтальпия разрушения  $H_{эфф}$  [1]. Для расчёта  $H_{эфф}$  кроме скорости массового уноса необходимо знать температуру деструкции материала  $T_w$ . Данная температура была определена с помощью тепловизора в ходе дополнительных испытаний на установке открытого типа. Полученные в ходе экспериментального исследования данные позволили рассчитать величину  $H_{эфф}$  для каждого материала и спрогнозировать работоспособность ТЗП двух типов для эксплуатационных условий.

### Список литературы

1. Полежаев Ю.В., Юрьевич Ф.Б. Тепловая защита // Под ред. Лыкова А.В. М.: Энергия, 1976. 392 с.

## РАССЕЯНИЕ МОНОМЕРОВ И МАЛЫХ КЛАСТЕРОВ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПУЧКА АРГОНА НА ФОНОВОМ ГАЗЕ

Деринг Е.Д.<sup>1,2</sup>, Дубровин К.А.<sup>1,2</sup>, Зарвин А.Е.<sup>1</sup>, Каляда В.В.<sup>1</sup><sup>1</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Данное исследование возникло как продолжение работ по изучению свойств сверхзвуковых кластированных потоков. Ранее было обнаружено, что в условиях развитой конденсации помимо недорасширенной сверхзвуковой струи образуется вторичный спутный поток больших размеров, предположительно состоящий из крупных кластеров, способных преодолеть боковые вихревые скачки струи («кластерный след») [1]. Подразумевается, что при проникании в фоновый газ окружающего струю пространства, такие кластеры, сталкиваясь с частицами фонового окружения, уменьшаются в размерах и отклоняются в сторону оси течения, формируя собственный поток.

Для описания механизма формирования «кластерного следа» необходимо детально изучить процесс рассеяния частиц кластированного потока на атомах фонового пространства, что является целью данного исследования.

Несмотря на то, что метод молекулярно-пучковой масс-спектрометрии был разработан еще в прошлом веке, он до сих пор активно используется для исследований в различных областях теплофизики и газодинамики [2 - 4]. Наряду с электронно-пучковой диагностикой, он является одним из самых эффективных способов исследования газовых потоков, расширяющихся в разреженное пространство или вакуум, поэтому активно используется для изучения кластированных потоков [5 - 8]. В данной работе метод молекулярно-пучковой масс-спектрометрии использовался для определения сечения рассеяния атомов и малых кластеров, полученных в сверхзвуковом потоке аргона.

Работа выполнена на вакуумном экспериментальном стенде «ЛЭМПУС-2» отдела прикладной физики физического факультета НГУ [9]. Рассмотрено рассеяние частиц молекулярного пучка аргона, сформированного из сверхзвуковой кластированной струи, на подаваемом в фоновое пространство диоксиде углерода. При различной степени конденсации в потоке получены зависимости относительной амплитуды сигнала, регистрируемого масс-спектрометром, от плотности газа в фоновом пространстве. Согласно [10] были рассчитаны искомые значения сечения рассеяния для мономеров, димеров и тримеров аргона.

Ожидалось, что полученные сечения рассеяния для каждого вида частиц будут постоянными вне зависимости от степени конденсации в потоке. Однако данное предположение не подтвердилось. Так, для атомов аргона, сечение рассеяния  $\sigma$  остается практически постоянным при среднем размере кластеров в потоке  $\langle S \rangle < 200$ , и уменьшается с ростом данной величины практически экспоненциально (см. рис. 1).

Нетрадиционными оказались и зависимости рассеяния малых кластеров.

В докладе анализируются возможные механизмы формирования молекулярных пучков с кластерами разного размера, а также возможные причины возникновения установленных зависимостей, в том числе, связанные с особенностями использования метода молекулярно-пучковой масс-спектрометрии для изучения сверхзвуковых потоков в условиях интенсивного кластерообразования.

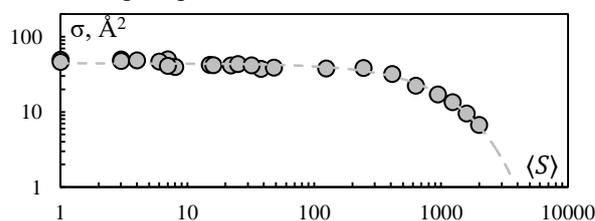


Рис. 1. Зависимость измеренного сечения рассеяния атомов аргона  $\sigma$  от среднего размера кластеров  $\langle S \rangle$  в потоке.

## Список литературы

1. Зарвин А. Е. и др. О структуре сверхзвуковой струи в условиях развитой конденсации // Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41. – №. 22. – С. 74-81.
2. Fárník M., Lengyel J. Mass spectrometry of aerosol particle analogues in molecular beam experiments // Mass Spectrometry Reviews. – 2018. – Т. 37. – №. 5. – С. 630-651.
3. Schenk M. et al. Detailed mass spectrometric and modeling study of isomeric butene flames // Combustion and flame. – 2013. – Т. 160. – №. 3. – С. 487-503.
4. Ellerweg D. et al. Characterization of the effluent of a He/O<sub>2</sub> microscale atmospheric pressure plasma jet by quantitative molecular beam mass spectrometry // New Journal of physics. – 2010. – Т. 12. – №. 1. – С. 013021.
5. Зарвин А. Е., Каляда В. В., Художитков В. Э. Особенности регистрации кластеров в сверхзвуковых недорасширенных струях методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24. – №. 5. – С. 691-702.
6. Milne T. A., Greene F. T. Mass spectrometric observations of argon clusters in nozzle beams. I. General behavior and equilibrium dimer concentrations // The Journal of Chemical Physics. – 1967. – Т. 47. – №. 10. – С. 4095-4101.
7. Van Deursen A., Van Lumig A., Reuss J. Intensities and cross-sections of Ar clusters in a molecular beam // International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics. – 1975. – Т. 18. – №. 2. – С. 129-135.
8. Fedor J. et al. Cluster cross sections from pickup measurements: Are the established methods consistent? // The Journal of chemical physics. – 2011. – Т. 135. – №. 10. – С. 104305.
9. Zarvin A. E. et al. Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2017. – Т. 45. – №. 5. – С. 819-827.
10. Леонас В. Б. Современное состояние и некоторые новые результаты метода молекулярного пучка // Успехи физических наук. – 1964. – Т. 82. – №. 2. – С. 287-323.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ FSUS-2020-0039) с использованием оборудования ЦКП «Прикладная физика» при ОПФ ФФ НГУ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ КАЛИБРОВКИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ОБЪЕКТА МЕТОДОМ ФАЗОВОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ****Зуев В.О.<sup>1,2</sup>, Двойнишников С.В.<sup>1</sup>, Кабардин И.К.<sup>1</sup>, Бакакин Г.В.<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет

В научных исследованиях процессов обледенения моделей функциональных элементов ветрогенератора с целью поиска наиболее эффективной противообледенительной технологии активно развиваются средства бесконтактного неразрушающего контроля трёхмерной геометрии наледи. Среди оптических методов контроля геометрии объекта технология на основе фазовой триангуляции стремительно адаптируется для задачи прецизионного контроля геометрии наледи в климатической аэродинамической трубе [1].

В ходе предыдущей работы [2] разработана технология калибровки измерителя на основе фазовой триангуляции с использованием плоской мишени с нанесённым на неё изображением периодичной структуры для измерений в условиях преломления оптических сигналов. Итеративно перемещая мишень вдоль измерительного объёма и используя ключевые точки периодичной структуры, в процессе калибровки в каждом пикселе матрицы фотоприемника устанавливается взаимно-однозначное соответствие между регистрируемой фазой синусоиды  $\varphi$  и трёхмерными координатами объекта  $(X, Y, Z)$ .

Так как для повышения качества калибровки требуется максимальная детализация калибровочных кривых, то из-за роста количества калибровочных измерений увеличивается число ключевых точек, которые необходимо обработать и определить пространственные и пиксельные координаты.

Целью данной работы является автоматизация калибровки системы контроля геометрии объекта методом фазовой триангуляции в климатической аэродинамической трубе с помощью разработки метода автоматизированного поиска ключевых точек на изображении фотоприёмника и однозначного восстановления их пространственных координат.

Для однозначного восстановления пространственных координат ключевых точек калибровочной мишени используется уникальный центральный элемент.

Для автоматизированного поиска ключевых точек на изображении фотоприёмника производится его бинаризация и ищутся полные совпадения с маской.

Для уменьшения погрешности восстановления координат ключевых точек на изображении фотоприёмника разработан метод уточнения их координат. Принцип работы метода основан на анализе локальной области ключевой точки после применения кросс-корреляции с ядром. Аппроксимируя значения кросс-корреляции вдоль горизонтального и вертикального пиксельных срезов, проходящих через координаты ключевой точки, квадратичной функцией, уточняется её положение, соответствующее вершине аппроксимирующей функции.

В ходе тестирования разработанных методов произведена автоматизированная калибровка системы

измерения трёхмерной геометрии наледи методом фазовой триангуляции в климатической аэродинамической трубе. Автоматический поиск ключевых точек на изображении фотоприемника и восстановление их 3D-координат выполнены корректно.

Проведено исследование эффективности разработанного метода уточнения положения ключевых точек. С помощью фотоприемника The Imaging Source DMM 25GP031-ML с разрешением 2592 x 1944 зарегистрировано изображение калибровочной мишени. На изображении вручную найдены координаты 30 ключевых точек. После этого размер изображения уменьшен в 6 раз и составил 432 x 324, что является характерным разрешением фотоприемника при измерении геометрии объекта методом фазовой триангуляции. Исходные координаты ключевых точек также изменены путем деления на 6. Полученные значения приняты в качестве истинных координат ключевых точек на изображении уменьшенного размера. Проведён поиск ключевых точек разработанным алгоритмом. Получены 2 набора координат ключевых точек: с использованием метода уточнения положения и без. Для каждой точки рассчитана величина ошибки детектирования ее положения. Без использования метода уточнения средняя и медианная ошибки составили 1.24 и 1.3 пикселя, соответственно. С использованием метода уточнения средняя и медианная ошибки составили 0.75 и 0.7 пикселя, соответственно. Таким образом, использование разработанного алгоритма снизило погрешность детектирования положения ключевой точки на 39%.

В результате разработан метод автоматизированной калибровки системы контроля геометрии объекта методом фазовой триангуляции в климатической аэродинамической трубе. Реализованы автоматический поиск ключевых точек на изображении фотоприемника и однозначное восстановление их пространственных координат. Благодаря разработанному методу автоматизированной калибровки обеспечена возможность нетрудозатратного изменения положения элементов измерительной системы для контроля наледи на различных участках объекта с последующей перекалибровкой.

**Список литературы**

1. Kabardin I., Dvoynishnikov S., Gordienko M., Kakaulin S., Ledovsky V., Gusev G., Zuev V., Okulov V. Optical Methods for Measuring Icing of Wind Turbine Blades // *Energies*. 2021. Т. 14, №. 20. С. 6485.
2. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю., Кабардин И.К. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов // *Теплофизика и аэромеханика*. 2023. №. 1. С. 127-132.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-19-00205).*

## РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБЛЕДЕНЕЛОГО ПРОФИЛЯ ЛОПАСТИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО АЭРОДИНАМИКИ

Кабардин И.К., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Степанов К.И., Мухин Д.Г., Зуев В.О., Гордиенко М.Р., Какаулин С.В., Ледовский В.Е., Гольцев Н.С.

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

Развитие ветроэнергетики привело к взрывному росту количества практически используемых источников энергии, объединённых в ветропарки [1]. Количество ветряных турбин в холодном и влажном климате активно увеличивается. Одной из существенных проблем при эксплуатации ветрогенераторов в таких условиях является обледенение лопастей [2]. Известно, что в области ветроэнергетики не существует надежных методов дистанционной диагностики обледенения [3]. Дистанционные методы измерения очень важны в различных секторах энергетики [4]. Разработка и совершенствование методов дистанционной диагностики обледенения - крайне актуальная задача в ветроэнергетике.

Целью работы является разработка комплексного метода диагностики профиля поверхности обледенелого профиля лопасти и исследования аэродинамики.

Измерение профиля обледенелой лопасти основано на методе фазовой триангуляции. [5]. Устройство содержит осветитель (источник структурированного освещения) и фотоприемник, смещённый в пространстве относительно осветителя. Источник и детектор подключены к компьютеру, который контролирует измерения и выполняет обработку данных. Объект последовательно освещается проецируемыми структурированными изображениями (серия кадров с изображениями параллельных полутоновых полос). Интенсивность проецируемых полос в поперечном направлении изменяется по периодическому закону с линейным сдвигом начальной фазы. Изображения объектов, полученные с направления, отличного от направления освещения, содержат искажения структурированных изображений, которые кодируют информацию о профиле поверхности. Для каждой точки изображения контролируемого объекта восстанавливается зависимость интенсивности от порядкового номера кадра. Декартовы координаты точки в пространстве определяются на основе значений локальной фазы, координат точки на изображении и калибровочных коэффициентов. Набор координат всех точек соответствует желаемому профилю поверхности трёхмерного объекта. [5].

Измерен профиль поверхности наледи экспериментально на элементе лопасти ветрогенератора с профилем RG-12 шириной 200 мм. Элемент лопасти помещался в климатическую аэродинамическую трубу со скоростью потока 3 м/с и температурой -12 °С. Для повышения влажности добавлялся поток аэрозоля. Получены изображения в пространстве 0,2 x 0,2 x 0,2 м. Расстояние до измеряемого объекта составляло 1 м, а расстояние между источником и детектором составляло 0,5 м. Количество кадров N составляло 200. При калибровке были проведены измерения 250 калибровочных мишеней, расположенных в разных

точках пространства с погрешностью установки координат менее 0,5 мм. Максимальный разброс измеряемых точек в плоскости не превышал 0,3 мм, а стандартное отклонение по пространству измерения оценивалось в 0,114 мм, т.е. относительная погрешность составила 0,057% от диапазона измерения.

Процесс образования наледи не стационарен и плохо воспроизводится при физическом моделировании. Поэтому для исследования аэродинамики было принято решение изготавливать элементы лопаток с помощью 3D печати, чтобы форма не менялась во времени. Формы обледенения использовались на основе измеренных в этой работе. Лопатки изготавливались из нескольких частей и склеивались.

Выполнены измерения скоростей потока на расстояниях до 400 мм за задним краем лопатки и силовые характеристики элемента лопасти, подвергшейся обледенению. Показано влияние обледенения на аэродинамические и силовые характеристики рис. 6. Для проведения экспериментов выбраны следующие параметры: скорость набегающего потока 0–12.5 м/с, длина хорды – 0.2 м, число Рейнольдса до 250 000, размер капле от 3 мкм до 1000 мкм, температура потока от 0 до -30 °С, углы атаки лопатки от 0 до 20 °С. Лопатки помещались в прозрачный канал климатической трубы. Шаг измерения по оси Z составлял 1 мм, шаг перемещения по оси X составлял 10 мм, углы атаки принимали значения 0, 4, 8, 12, 16, 20 градусов, скорость набегающего потока принимала значения 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5 м/с.

Показано более раннее образование зон возвратного течения по сравнению с лопаткой в отсутствие обледенения. Поля расходной проекции скорости показали, что при образовании наледи зона возвратного течения в случае отрыва потока оказывается почти в 2 раза большей, чем для лопатки без обледенения, а значения отрицательной проекции скорости интенсивнее на 50 %.

### Список литературы

1. Ronsten G. Svenska erfarenheter av vindkraft i kallt klimat – nedisning, iskast och avisning Elforsk rapport. 2004. b.
2. ISO 12494. 2001 Atmospheric icing of structures.
3. Siefert H. Technical requirements for rotor blades operating in cold climate // Wind engineering. 2003. №3. С. 69-79.
4. Dvoynishnikov S. V., Anikin Y. A., Kabardin I. K., Kulikov D. V., Meledin V. G. An optoelectronic method of contactless measurement of the profile of the surface of large complexly shaped objects // Measurement science and technology. 2016. № 59. С. 21–27.
5. Dvoynishnikov S. V., Rakhmanov V. V., Kabardin I. K., Meledin V. G. Phase triangulation method with spatial modulation frequency optimization // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation 2019. № 145. С. 63-70.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 21-19-00205).

## 3D РЕГИСТРАЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Кирчанова Е.Е.<sup>1,2</sup>, Попов Я.Е.<sup>1,2</sup>, Токарев М.П.<sup>1,2</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>

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

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет

ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

В настоящее время изучение объёмной аэродинамики остается актуальным при решении прикладных задач в различных областях: авиация, ракетостроение, проектирование наземного и морского транспорта, градостроительство, экология и другие. В реальных условиях исследуются объекты непосредственно в среде, где на объект влияет большое количество факторов. Для исследования используются различные оптические методы, которые работают с изображением с разных камер [1]. Наиболее часто применяемые методы:

- Трёхмерная анемометрия слежения за частицами (3D-PTV) [2], позволяющая отследить местоположение и скорость каждой частицы;
- Томографическая цифровая трассерная визуализация (Томо-PIV) [3], восстанавливающая объёмные изображения, по которым определяется групповая скорость частиц в потоке;
- Метод Лагранжа [4] – совокупность первых двух методов, наиболее современный метод.

Данная работа посвящена развитию частной реализации метода Лагранжа – метода восстановления частиц и его применению к обработке реального эксперимента с мелкомасштабным летательным аппаратом.

Метод предполагает съёмку изображений с высоким временным разрешением. На первых четырёх шагах местоположения частиц находятся с помощью алгоритма триангуляции, далее используется метод Томо-PIV с грубой сеткой и предсказывает основное направление движения частиц, после чего методом 3D-PTV определяются частицы, движущиеся с этой скоростью и создаются треки частиц. В последующих итерациях предсказывается траектория каждой такой частицы в аналитической функции с уточнением её координат по проекциям в следующие моменты времени. Затем частицы с известными траекториями удаляются с изображений, а местоположения оставшихся находятся с помощью алгоритма триангуляции.

Важным шагом в работе метода является калибровка камер, она должна быть как можно точнее, чтобы местоположения частиц восстанавливались алгоритмом триангуляции, как можно лучше.

Был реализован экспериментальный комплекс оптической 3D диагностики поля скорости потока и отслеживания перемещения и ориентации малоразмер-

ного летательного аппарата – квадрокоптера (Рис.1). Для съёмки использовались три современных скоростных камеры Photron Fastcam Nova S12 с частотой съёмки 1 кГц. Расстояние от объективов камер до объекта исследования составляло 1,5 м. В качестве трассерных частиц использовались пенопластовые сферы диаметром 0,5 мм. В качестве объекта исследования был использован квадрокоптер марки DJI Mavic Mini. Для калибровки камер была создана калибровочная мишень размером 720x720 мм с шагом 18 мм между центрами соседних маркеров, позволяющая провести калибровку по всей области измерений.

В ходе работы были восстановлены местоположения частиц для первых четырёх кадров с помощью триангуляции, а также для всех остальных кадров с помощью метода восстановления частиц.

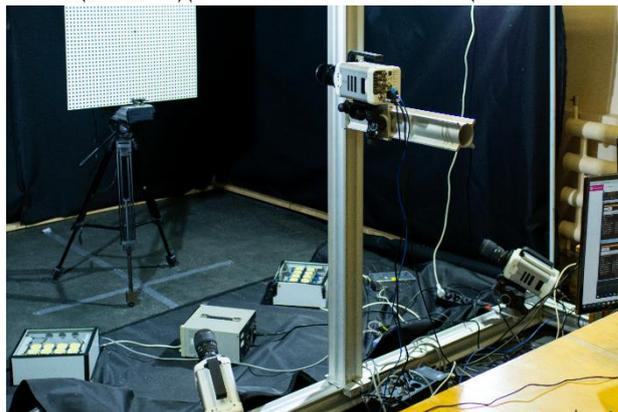


Рис.1. Фото экспериментального стенда

### Список литературы

1. Xu H. et al. High order Lagrangian velocity statistics in turbulence //Physical review letters. – 2006. – Т. 96. – №. 2. – С. 024503.
2. Virant M., Dracos T. 3D PTV and its application on Lagrangian motion //Measurement science and technology. – 1997. – Т. 8. – №. 12. – С. 1539.
3. Atkinson C., Soria J. An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry //Experiments in Fluids. – 2009. – Т. 47. – №. 4. – С. 553-568.
4. Schanz D., Gesemann S., Schröder A. Shake-The-Box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities //Experiments in fluids. – 2016. – Т. 57. – №. 5. – С. 1-27.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-19-00803).*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Нефедова В.В.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации  
Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»,  
ул. Онежская 8, Москва, 125438, Россия

В настоящее время много внимания уделяется разработке составов и способов получения высокоэффективных систем тепловой защиты. Для подтверждения работоспособности материалов со сверхтугоплавкими покрытиями требуется исследование их термохимической стойкости в высокотемпературном воздушном потоке. В качестве объекта исследования были выбраны цилиндрические образцы углерод-керамических композиционных материалов (УККМ) с содержанием в составе кремния, гафния, циркония.

Основной целью работы являлось сравнение представленных типов керамических материалов и определение материала с самой высокой термохимической стойкостью.

Проведена серия испытаний образцов композиционных материалов в условиях, моделирующих уровень теплового потока до  $5 \text{ МВт/м}^2$ . Испытания проводились в струе, создаваемой электродуговым подогревателем (ЭДП) типа «Звезда» [1], работающего на переменной сети номинальным напряжением 10кВ. Рабочим телом ЭДП «Звезда» является воздух. Температура струи газа, натекающего на образец, достигается с помощью смешения горячего, подогретого электрической дугой, и холодного воздуха в подготовительной камере. Образец располагается соосно с проточным трактом сверхзвукового сопла установки. Для выбора режимов испытаний, варьировался расход холодного воздуха, при помощи которого температура смеси задавалась от 2100 К до 2300 К [2].

Получены данные о термохимической стойкости образцов на разных режимах работы в высокотемпературной среде и измерения теплового потока. Температура на поверхности образцов определялась с помощью термовизора (см. рис. 1).

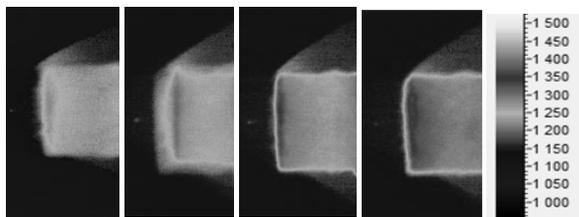


Рис. 1. Схема установки образца УККМ в державке

В процессе проведенных испытаний определены:

- температура рабочей поверхности образца композиционного материала;
- величины массового и линейного уноса;
- исследована микроструктура образцов до и после испытания.

При помощи пакета АэроГидро ПО «Логос» было описано распределение набегающего теплового по-

тока конвективной горячей стенки для восстановления теплового поведения образцов.

Исследованная микроструктура образцов на растровом микроскопе показала изменение массового состава включений в процессе испытания (см. рис. 2).

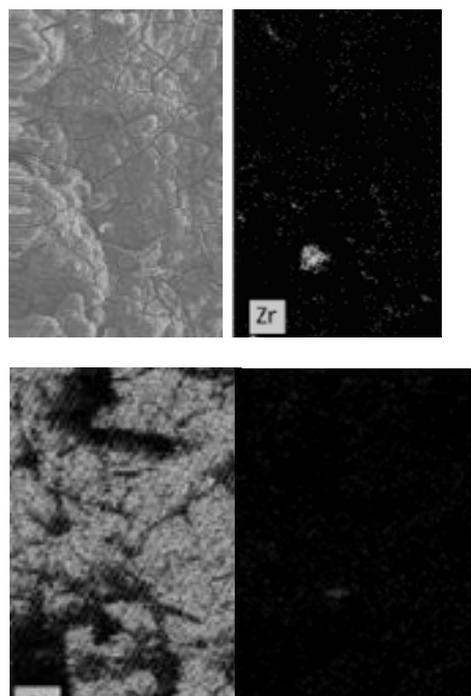


Рис. 2. Микрофотографии поверхности образца (200  $\mu\text{м}$ )

По результатам испытаний было выявлено, что материал на основе карбида кремния показал лучшую стойкость в заданных условиях по сравнению с остальными [3].

Совместные усилия экспериментальных работ и численного моделирования позволили провести сравнительную оценку углерод-керамических материалов. Полученные результаты испытаний в виде определённых термохимических характеристик материалов могут быть применены при пересчёте результатов на натурные условия.

### Список литературы

1. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет / А. С. Коротеев, В. М. Миронов, Ю. С. Свирчук. – М.: Машиностроение, 1993. – 296 с.
2. Основы теории тепловых ракетных двигателей. Теория, расчет и проектирование / А.А. Дорофеев – М.: Машиностроение, 2014. – 571 с.
3. Полежаев Ю.В., Фролов Г.А. Тепловое разрушение материалов // Под ред. Скорохода В.В. Киев: Изд-во ИПМ НАНУ, 205. 288 с.

Попов Я.Е.<sup>1,2</sup>, Кирчанова Е.Е.<sup>1,2</sup>, Дулин В.М.<sup>1,2</sup>

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

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,

ул. Пирогова 1, Новосибирск, 630090, Россия

Одной из ключевых задач при проектировании камер сгорания является проблема эффективного диспергирования жидкого топлива. Важным шагом для решения этой проблемы является определение параметров форсунок. Наличие дефектов и неточностей при их изготовлении приводит к значительной неравномерности факела распыла, что может приводить к снижению эффективности (полноты) сжигания топлива, повышенному образованию сажи, коксованию элементов камер сгорания и горелочных устройств.

Наиболее простыми и часто применяемыми распылителями являются струйные и центробежные форсунки [1]. В первом случае из отверстия в распылителе вытекает струйка жидкости в спутный или поперечный поток воздуха. Во втором случае перед отверстием присутствует вихревая камера, где поток закручивается до выхода из отверстия путем подачи жидкости в камеру через тангенциальные подводы.

Данная работа посвящена разработке программно-аппаратного комплекса для автоматизированного определения параметров струйных и центробежных форсунок. К определяемым параметрам относятся пространственная ориентация распыла и положение зоны распада распыла на капли.

Поскольку для решения поставленной задачи требуется определение сложной геометрической структуры потока, оптимальным методом для его анализа представляется метод теневой фотографии.

В ходе работы был разработан автоматизированный программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить полный цикл работ по измерению параметров изучаемых форсунок. Разработан модуль, позволяющий проводить настройку и управление экспериментальным оборудованием, проводить автоматизированный сбор данных с помощью измерительной установки. Также разработан модуль, отвечающий за хранение собранных экспериментальных данных.

Измерительный комплекс состоит из камеры Imrex B2720. Мощного импульсного светодиодного источника, расположенного напротив камеры и синхронизирующего процессора. Исследуемый объем располагается между камерой и осветителем. Возможность съёмки исследуемого распыла с различных ракурсов обеспечена моторизованным устройством позиционирования GRINIK MS-300-700-R700. В совокупности измерительный комплекс позволяет проводить автоматизированную съёмку распыла по заранее составленной программе измерения. Пример

фрагмента полученного изображения изображён на рис. 1.

Для обработки полученных изображений был разработан пакет математических алгоритмов. Основой разработанного пакета является алгоритм выделения границ потока на теневой фотографии.

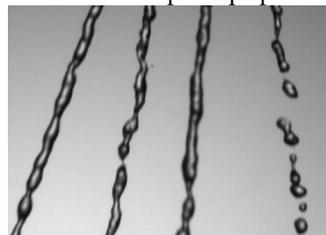


Рис. 1. Пример снимка распыла струйной форсунки

Алгоритм выделения границ проводит построчный анализ изображений. На первой итерации алгоритм проводит поиск границ распыла на изображении путём поиска максимумов градиента интенсивности первой строки.

Далее происходит поиск продолжений границ. Для этого в снова производится построчный поиск пиков градиента, но только в окрестности точек, в которых была обнаружена граница на предыдущей итерации.

Обнаруженные границы объединяются в структуры, позволяя выделять отдельные края распыла и определять зоны распада распыла. Пример изображения с выделенными границами приведён на рис. 2.



Рис. 2. Пример обработанного изображения. Границы выделены жирными линиями. Для центральной струи так же линиями выделены направляющие прямые.

Для валидации разработанных алгоритмов проводилось сравнение обнаруженных границ потока с видимыми на изображении границами.

#### Список литературы

1. Lefebvre A. H., McDonell V. G. Atomization and sprays. – CRC press, 2017.

## ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Савицкий А.Г.

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

Для снижения эмиссии вредных веществ при горении в камерах сгорания газотурбинных установок активно используется технология сжигания бедной (со значительным избытком воздуха) предварительно перемешанной смеси [1]. Однако известно, что в таких условиях пламя становится менее устойчивыми к внешним воздействиям. Это может приводить к термоакустическим пульсациям, которые, в свою очередь, становятся причиной разрушения узлов камеры сгорания [2]. Детальное экспериментальное исследование взаимодействия потока с пламенем в трёхмерных течениях, часто нестационарных, опирается на анализ локального тепломассопереноса и специфику химических реакций. Подобный анализ требует одновременных измерений скорости, температуры и концентрации молекул.

В последние годы широко используются бесконтактные методы оптической диагностики для измерения пространственных распределений скорости и температуры, такие как анемометрия по изображению частиц (Particle Image Velocimetry, PIV) и планарная лазерно-индуцированная флуоресценция (Planar Laser-Induced Fluorescence, PLIF).

Температура газа очень важна для понимания физико-химического процесса горения, поскольку она оказывает существенное влияние на скорость химических реакций и, следовательно, на эффективность горения, образование загрязнений и скорость тепловыделения. Надёжные измерения температуры необходимы для проверки численных и теоретических моделей, а также для экспериментальной диагностики пламени. Несмотря на то, что интрузивные методы, такие как датчики с термопарами, просты в использовании, они искажают исследуемый поток. Оптические методы более актуальны для измерения температуры, поскольку они практически неинтрузивны и обладают высоким пространственным и временным разрешением. Метод термически-активированной планарной лазерно-индуцированной флуоресценции (thermally-assisted PLIF) может быть успешно использован для двумерных измерений температуры. Этот подход основан на однократном лазерном облучении и оценке локального соотношения интенсивности излучения двух различных диапазонов спектра излучения. В частности, соотношение между переходом (2-0) и переходами (1-1), (0-0) обеспечивает почти линейную зависимость от температуры в диапазоне от 1200 до 2200 К при возбуждении переходом Q1(8) полосы (1-0). [3].

Цель данной работы – исследование пространственной структуры полей температуры и скорости для модельного двухзонного фронтального устройства камеры сгорания газотурбинного типа, реализующего бедное горение частично перемешанной смеси при подаче топлива через центральный канал.

Эксперименты проводились в открытой модельной вихревой камере сгорания с оптическим доступом. Схема камеры сгорания и расположение оборудования, используемого для PIV/PLIF измерений, представлена на рис. 1. Конструкция сопла изображена на вставке. Выходной диаметр сопла составлял 37 мм. Внутренний диаметр центрального канала составлял 5.8 мм. Основной поток воздуха, проходящий через радиальный завихритель, засеивался частицами  $\text{TiO}_2$ . Расход основного воздуха составлял 400 л/мин, топлива – 27.1 л/мин. Число Рейнольдса, рассчитанное на основании объёмной скорости основного потока и вязкости воздуха, составляло  $1.5 \times 10^4$ , коэффициент избытка топлива  $\phi = 0.65$ .

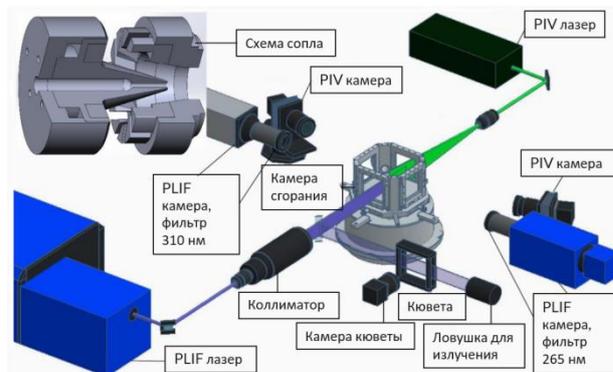


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Для возбуждения флуоресценции радикала ОН использовался перестраиваемый лазер на красителе, накачиваемый импульсным Nd:YAG лазером. Интенсивность флуоресценции радикала ОН регистрировалась двумя камерами, оборудованными фильтрами, пропускающими излучение в диапазонах  $310 \pm 10$  нм и  $265 \pm 5$  нм. Частицы оксида титана освещались двухканальным импульсным Nd:YAG лазером (длина волны 532 нм). Регистрация рассеянного света производилась двумя камерами, оснащёнными узкополосными фильтрами.

### Список литературы

1. Dunn-Rankin D. Lean Combustion: Technology and Control // The Aeronautical Journal. London: Cambridge University Press. 2008 112, №1131.
2. Meier W. et al. Detailed characterization of the dynamics of thermoacoustic pulsations in a lean premixed swirl flame // Combust. Flame. Elsevier. 2007, №1–2. P. 2-26.
3. Dulin V. et al. Assessment of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the A2Σ+–X2Π (1-0) band // Proc Combust Inst. 2021, №. 38(1). P. 1877-1883.

Работа выполнена при поддержке РФФ  
(грант № 22-19-00803).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ

Савицкий А.Г., Толстогузов Р.В.

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

Стабилизация пламени в горелочных устройствах и камерах сгорания обычно обеспечивается за счёт организации локальной рециркуляции потока или застойных зон. Однако такие зоны могут приводить к локальному перегреву деталей камеры сгорания и увеличению гидравлических потерь. Более того, при сжигании смесей со значительным избытком воздуха, являющимся в настоящее время основной технологией снижения вредных выбросов ( $\text{NO}_x$ , сажи) в камерах сгорания, следует избегать больших зон рециркуляции, где продукты горения имеют большое время пребывания. Таким образом, актуальной задачей является развитие альтернативных методов стабилизации пламени в камерах сгорания. Ряд работ показывает, что воздействие электрического поля на пламя углеводородных смесей повышает стабильность пламени (например, см. [1]). В литературе присутствуют описания различных физических и химических механизмов, которые могут влиять на пламя. Большинство работ, связанных с влиянием электрического поля на пламя, демонстрируют, что слабые электрические поля могут существенно влиять на скорость распространения пламени, однако данных об изменениях в распределении температуры в пламени представлены в малом количестве. Для изучения этой темы необходимы дальнейшие исследования.

Метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF) позволяет регистрировать 2D-распределения температуры в потоке. Используемый в работе метод (Two-line LIF) основан на регистрации отношения интенсивности сигнала флуоресценции при возбуждении двух линий перехода в одно верхнее электронное состояние. В случае использования ОН как возбуждаемой молекулы, производилось возбуждение перехода (1–0) (вблизи 282 нм) электронной системы  $\text{A}^2\Sigma^+ - \text{X}^2\Pi$  и регистрации интенсивности излучения линий (1–1) и (0–0) (в диапазоне 300–320 нм). Для реализации метода Two-line ОН PLIF использовалась комбинация двух линий  $Q_1(5)$  и  $Q_1(14)$  для перехода (1–0) в качестве одной из наиболее эффективных пар [2].

Целью настоящего исследования было изучение влияния постоянного электрического поля на распределение температуры в ламинарных конусообразных пламях предварительно перемешанных смесей (метан/воздух, пропан/воздух). Акцент в работе сделан на количественной оценке распределения температуры при отсутствии и при наличии электрического поля. Экспериментальная установка состояла из осесимметричного сужающегося сопла с внутренним диаметром равным  $d = 15$  мм. Часть сопла была выполнена из диэлектрического материала (капрон) для гальванической развязки сопло-земля. В сопло производилась подача предварительно перемешанной смеси горючего газа (метана, пропа-

на) и воздуха. Число Рейнольдса было равно  $Re = 1000$ , коэффициент избытка топлива был равен  $\Phi = 0.92$  и  $0.85$  для метана и пропана, соответственно. Контроль расходов компонентов смеси регулировался массовыми расходомерами Bronkhorst El-Flow. Вблизи кромки сопла были установлены две параллельные металлические пластины, между которых было организовано постоянное электрическое поле с максимальной напряженностью  $E = 62.5$  кВ/м при помощи высоковольтного источника питания.

Для реализации метода лазерно-индуцированной флуоресценции использовался импульсный лазер накачки Nd:YAG QuantaRay (532 нм), перестраиваемый импульсный лазер на красителе Sirah Precision Scan. Лазерный луч разворачивался в лазерный нож с использованием коллимирующей оптики (LaVision) и освещал центральное сечение исследуемого потока. Энергия лазерного импульса составляла приблизительно 10 мДж до коллимирующей оптики. Регистрация сигнала флуоресценции производилась с помощью интенсифицированной КМОП камеры LaVision Imager sCMOS, подключённой к усилителю на основе ЭОП LaVision IRO, на усилитель камеры был установлен УФ-объектив и полосовой фильтр ( $310 \pm 10$  нм), позволяющий исключить влияние собственного свечения пламени и выделить необходимый участок длин волн спектра флуоресценции радикала ОН.

В ходе эксперимента были получены фотографии пламени, а также изображения ОН PLIF для переходов  $Q_1(5)$ ,  $Q_1(8)$  и  $Q_1(14)$ . Для учёта неравномерности лазерного излучения в плоскости измерения и других факторов был использован ряд процедур обработки изображений. Кроме того, была протестирована линейность режима флуоресценции для каждого возбужденного перехода. Наконец, были получены поля температуры на основе соотношения  $Q_1(5):Q_1(14)$  для пламени как с электрическим полем, так и без него. Было замечено, что электрическое поле изменяет форму пламени, наклоняя и деформируя конус в направлении, нормальном к пластинам.

### Список литературы

1. Kuhl J., Jovicic G., Zigan L., Will S., Leipertz A. Influence of electric fields on premixed laminar flames: Visualization of perturbations and potential for suppression of thermoacoustic oscillations // Proc. Combust. Inst. 2015. V. 35(3). p. 3521–3528.
2. Lobasov A. S., Tolstoguzov R. V., Sharaborin D. K., Chikishev L. M., Dulin V. M. On the efficiency of using different excitation lines of (1–0) two-line ОН fluorescence for planar thermometry // Thermophysics and Aeromechanics. 2021. V. 28(5). p. 751–755.

*Работа выполнена при поддержке РФФ  
грант № 22-19-00803.*

Федотов И.А., Токарев М.П.

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

Современные подходы диагностики газожидкостных потоков включают в себя оптические методы, позволяющие качественно и количественно определять основные параметры различных типов течений. К ним относятся, например, распределение неоднородностей плотности в газах и отдельных фазах в многофазных течениях при использовании теневой съёмки, распределения мгновенной скорости при регистрации картин рассеяния взвешенных в потоке трассеров [1]. Такие методы имеют ряд преимуществ, включая бесконтактность, высокую точность измерений и широкий динамический диапазон, а также высокую скорость сбора информации.

Осуществление исследований в этой области обусловлено необходимостью получения верифицируемых экспериментальных данных по структуре течения в проточных частях тепловыделяющих сборок, для успешной разработки эффективных газотурбинных установок и форсунок в камерах сгорания, оптимальных форм корпусов транспортных средств и других приложений.

Большинство оптических методов требует использования внешнего зондирующего источника излучения высокой мощности, такие как лазеры и газоразрядные лампы. В настоящее время в ряде случаев для подсветки области потока возможно использование недорогих современных импульсных светодиодов, которые могут работать на значительно более высоких токах, по сравнению с обычными светодиодами, с использованием коротких по длительности импульсов [2]. При этом температура внутри подложки такого светодиода остается ниже пороговой температуры повреждения, а генерация фотонов увеличивается пропорционально увеличению тока.

Данная работа посвящена разработке импульсного светодиодного источника света высокой мощности на базе COB (chip on board) светодиода с номинальной мощностью 100 Вт, состоящего из матрицы  $10 \times 10$  1 Вт светодиодов, расположенных параллельно последовательно со световой отдачей около 100 лм/Вт, угол раскрытия светового потока без линзы  $120^\circ$  и с линзой  $90^\circ$ .

Проведены измерения освещённости, создаваемой светодиодом в соответствии с измеренной вольт-амперной характеристикой в импульсном режиме с перегрузкой.

На базе этого светодиода реализован импульсный источник освещения. В данном осветителе разработан модуль изменения потребляемой мощности в диапазоне 20-200% от номинальной мощности в импульсе, где максимальная мощность обеспечивает прирост светового потока на 30%.

В осветитель интегрирован модуль, позволяющий синхронизировать световой импульс с моментом регистрации цифровой камерой с точностью до 100 нс при этом минимальная длительность светового импульса составляет 1 мкс.

На данный момент этот осветитель успешно протестирован на ряде задач оптической диагностики течений, таких как теневая фотография с оценкой скорости и размеров сферических капель в распыле на выходе из форсунки (см. рис. 1) и 3D регистрации треков отдельных частиц в потоке вблизи квадрокоптера. Однако возможности применения данного осветителя не ограничены представленными примерами, он также подходит для применения в томографической версии PIV измерений [3].

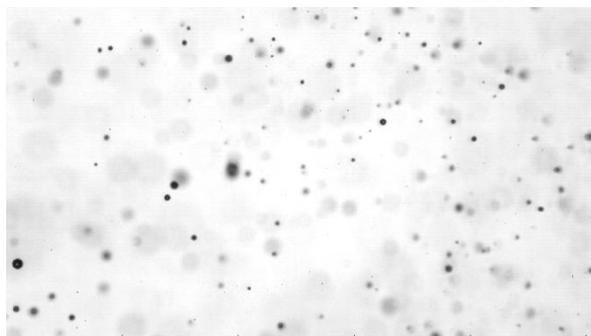


Рис. 1 Пример теневой фотографии капель полученной с помощью светодиодного осветителя

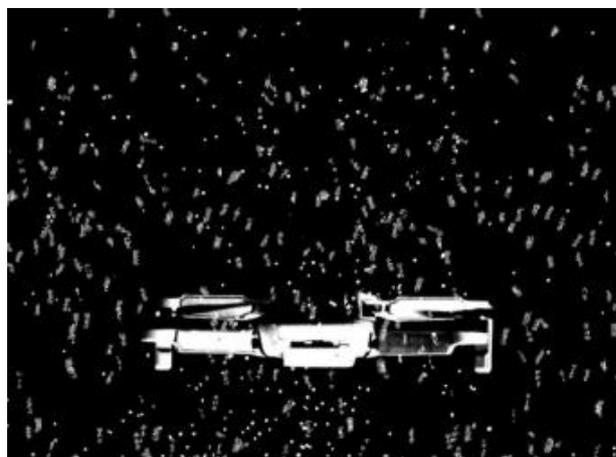


Рис. 2 Пример рассеянного света на частицах в потоке вблизи квадрокоптера во время 3D измерений скорости

#### Список литературы

1. Бойко В. М. и др. Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте //Новосибирск: НГУ. – 2009. 450 с.
2. Wilson S. et al. Performance evaluation of an overdriven LED for high-speed schlieren imaging // Journal of Visualization. 2015. V. 18. N 1. P. 35-45.
3. Scarano F. et al. On the use of helium-filled soap bubbles for large-scale tomographic PIV in wind tunnel experiments //Experiments in Fluids. 2015. V. 56. N. 2. P. 1-12.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-19-00587).



# СЕКЦИЯ 8

## Теплофизические свойства веществ и новые материалы





## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ТЕПЛОЁМКОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ РЕЗЕРВУАРНЫХ ПОРОД, НАСЫЩЕННЫХ ТЯЖЁЛОЙ НЕФТЬЮ, ДО И ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ

Абдулагатова З.З.<sup>1</sup>, Абдулагатов И.М.<sup>1,2</sup>, Григорьев Б.А.<sup>3</sup>, Бакмаев А.Г.<sup>4</sup>, Омаров З.М.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Дагестанский государственный университет, Российская Федерация, 367000, Республика Дагестан, Махачкала, ул. М. Гаджиева, д.43-а

<sup>2</sup> Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН г. Махачкала, Российская Федерация, 367030, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д. 75

<sup>3</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 195112, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Малая Охта, Малоохтинский пр-кт, д. 45, литера А, помещ. 2-Н, офис 812

<sup>4</sup> Институт Физики ФНИЦ РАН, ул. М.Ярагского, 94, 367015 Махачкала, Россия

Тепловые свойства резервуарных пород (температуропроводность, теплоёмкость и теплопроводность) являются ключевыми параметрами моделирования резервуаров (нефтяных, геотермальных и для хранения CO<sub>2</sub>). Точные данные о тепловых свойствах резервуарных пород крайне необходимы для инженерных расчётов при тепловых методах вытеснения тяжёлой нефти. Резервуарные материалы (горные породы) представляют собой сложные системы, состоящие в основном из пустот (пор), заполненных геотермальными флюидами, нефтью или газом (природный газ или CO<sub>2</sub> от промышленных выбросов при его захоронении в резервуарах), а также из различных минералов. Пористость может изменяться за счёт напряжений, испытываемых резервуарной породой. Поэтому в качестве объектов исследования выбраны реальные (естественные) резервуарные породы, насыщенные тяжелой нефтью.

Измерения температуропроводности проводились бесконтактным методом лазерной вспышки (LFA 457 LaserFlash, NETZSCH, Германия), а теплоёмкости – дифференциальным-сканирующим калориметр (DSC 204 F1, Phoenix, NETZSCH, Германия) в интервале температур от комнатных до 771 К.

Экспериментальные измерения температуропроводности, теплоёмкости резервуарной породы (№ 100/13Д, Месторождение Чаяндинское НГКМ. Пласт Талахский, Глубина 1802.56 м, Рпл=12.0 МПа, Тпл=12 °С, Пористость=8.6 %, Проницаемость = 1.5 мД, плотность 2430 кг/м<sup>3</sup>.), насыщенной тяжёлыми углеводородами, были проведены в интервале температур от комнатных до 800 К. Полученные результаты, вместе с данными о плотности, были использованы для расчёта теплопроводности этих же образцов на основе теоретического соотношения,  $\lambda = \alpha \rho c$  в том же интервале температур.

При высоких температурах (выше 700 К) обнаружено влияние термического разложения тяжелых углеводородов на поведения тепловых свойств системы порода + насыщенная тяжелая нефть. Полученные экспериментальные данные и корреляционные модели могут быть использованы для разработки термодинамической модели нефтяного резервуара при создании технологии вытеснения тяжелых углеводородов тепловыми методами.

Асильбеков А.К.<sup>1</sup>, Слюсарский К.В.<sup>1,2</sup>, Ларионов К.Б.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина 30, Томск, 634050, Россия<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, ул. Весенняя 28, Кемерово, 650000, Россия

Одним из современных и экологически безопасных способов переработки шин является пиролиз [1]. Товарным продуктом пиролиза отработанных шин является пиролизное масло, которое может быть использовано в качестве топлива для котельных установок [2] или сырья для нефтехимических производств [3]. Для пиролизного масла нефтехимическая отрасль имеет более высокую привлекательность и технологический потенциал ввиду высокой стоимости получаемых конечных продуктов, а также снижения зависимости производств от ископаемого топлива – нефти. Одним из вариантов применения пиролизных масел отработанных шин в нефтехимическом производстве является извлечение различных типов фракций (лёгкой (<180 °С), средней (180-250 °С) и тяжёлой (250-350 °С)).

Тяжёлая фракция, как и само пиролизное масло могут быть использованы в качестве сырья для получения технического углерода для резинотехнической и шинной промышленности.

Ранее [4] нами был апробирован метод безвакуумной электродуговой газификации различных пиролизных масел, полученных путем пиролизной переработки отработанных шин, древесных отходов и нефтяных шламов. По результатам исследования был получен обогащённый водородом синтез-газ (до 54 об% содержания водорода) и нанодисперсный углеродный материал со значением удельной поверхности 64,1-101,4 м<sup>2</sup>/г.

Настоящая работа посвящена фракционированию пиролизного масла отработанных шин (на лёгкие (< 180 °С), средние (180-350 °С) и тяжёлые фракции (> 350 °С)) и последующему исследованию получения водородсодержащего синтез-газа и углеродного материала методом электродуговой газификации.

Извлечение и определение физико-химических характеристик фракций (н.к.-180 °С, 180-350 °С и > 350 °С) в образце пиролизного масла отработанных шин было осуществлено с использованием аппарата ректификации нефти конструкции: АРН-2 производства ЗАО СКБ "Хроматэк". Извлеченные фракции характеризовались большим содержанием непредельных углеводородов, низкой температурой застывания (менее -80 °С), а также различным содержанием серы (от 0,5 до 0,9 мас%) в зависимости от типа полученной фракции.

Синтез-газ, образующийся в процессе электродуговой газификации исследуемых образцов жидких углеводородов, характеризуется высоким энергетическим и промышленным потенциалом, что связано с повышенным содержанием водорода (H<sub>2</sub> = 22,7 - 37,3 об%), метана (CH<sub>4</sub> = 7,3 - 25,1 об%) и монооксида углерода (CO = 24,8 - 28,6 об%).

По данным растровой электронной микроскопии (рисунок 1) установлено, что полученные образцы углеродного материала представлены в виде структурно неоднородных массивов округлых субмикронных углеродных частиц, средний размер которых варьируется (на полученных СЭМ-изображениях) в интервале от 50 до 250 нм.

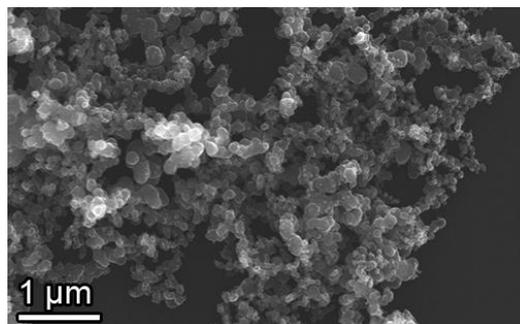


Рис. 1 - Типичные кадры РЭМ исследуемых образцов углеродного материала. Приближение x20 000.

Удельная поверхность образцов определяется широким интервалом значений – S<sub>уд</sub> = 38,8-79,7 м<sup>2</sup>/г. Значения пористости и среднего размера пор определяются более узкими интервалами (0,06–0,19 см<sup>3</sup>/г и 6,7–9,5 нм соответственно).

Значения удельной поверхности углеродного материала, полученного из исходного пиролизного масла отработанных шин и извлеченной из него фракции при температуре свыше 350 °С сопоставимы с требованиями CAS: 1333-86-4. Данные требования распространяются на технический углерод, используемый в качестве добавки при производстве резинотехнических изделий.

#### Список литературы

1. Paul T. W. Pyrolysis of waste tyres: a review //Waste Manag. – 2013. – Т. 33. – С. 1714-1728.
2. Aziz M. A., Rahman M. A., Molla H. Design, fabrication and performance test of a fixed bed batch type pyrolysis plant with scrap tire in Bangladesh //Journal of radiation research and applied sciences. – 2018. – Т. 11. – №. 4. – С. 311-316.
3. Quek A., Balasubramanian R. Liquefaction of waste tires by pyrolysis for oil and chemicals—A review //Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2013. – Т. 101. – С. 1-16.
4. Larionov K. B. et al. Electric arc gasification of pyrolysis oil with the production of hydrogen-enriched synthesis gas and carbon nanomaterial //Fuel Processing Technology. – 2023. – Т. 245. – С. 107746.

Работа выполнена при финансовой поддержке  
Министерства науки и высшего образования  
Российской Федерации (проект №075-03-2021-138/3  
(FZES-2021-0008))

Богатищева Н.С., Галкин Д.А.

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

Исследование теплофизических свойств бинарных систем с ограниченной совместимостью компонентов представляет фундаментальный и практический интерес. Такие растворы являются потенциальными теплоносителями в системах с повышенным тепловыделением [1,2]. В качестве объектов исследования выбраны растворы 2,6-лутидин / вода и гваякол / глицерин, которые характеризуются наличием нижней (НКТР) и верхней (ВКТР) критических температур растворения, т.е., имеют на фазовой диаграмме (температура / концентрация) замкнутую область несовместимости компонентов [3, 4].

В докладе будут представлены результаты измерения теплопроводности и температуропроводности растворов 2,6-лутидин / вода и гваякол / глицерин.

Для измерения коэффициента теплопроводности использовалась установка [5,6], реализующая метод нестационарного нагрева проволочного зонда – термометра сопротивления. Одним из основных условий данного метода, выполнение которого требует модель, является поддержание постоянной плотности теплового потока. Это достигнуто путем поддержания постоянной мощности на нагревателе-зонде в процессе измерения теплопроводности исследуемого образца. В ходе эксперимента на платиновый нагреватель-зонд длиной 5 см подается импульс постоянной электрической мощности длительностью 2 секунды. За это время исследуемая жидкость нагревается приблизительно на 3 °С. Данный температурный напор был выбран как компромисс между повышением чувствительности установки и необходимостью избежать появления конвекции в процессе измерений.

Измерение температуропроводности растворов проводилось методом лазерной вспышки на установке LFA-427 фирмы NETZSCH в статической инертной атмосфере (Ar 99,998 мол.%). В эксперименте использовались два контейнера, изготовленные из нержавеющей стали, с разной толщиной слоя исследуемого вещества: 0.48 мм и 0.4 мм. По нашим оценкам погрешность измерения для жидких соединений не превышает 5 %.

Измерения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности системы гваякол / глицерин выполнены при атмосферном давлении в диапазоне значений температуры от комнатной до температуры фазового разделения по механизму жидкость-жидкость (нижней ветви бинодали) и выше температуры фазового разделения жидкость-жидкость (верх-

ней ветви бинодали) в полном диапазоне концентраций. Достижение температуры фазового разделения в ходе повышения температуры в измерительной ячейке определялось по излому температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Таким образом, была сделана оценка положения нижней ветви бинодали жидкость-жидкость системы на диаграмме температура / концентрация.

Для чистых компонентов растворов были получены уравнения, описывающие зависимость температуропроводности и теплопроводности от температуры в исследованном температурном диапазоне, которые использовались для оценки изобарной теплоёмкости этих веществ.

Предложены уравнения для расчёта теплопроводности и температуропроводности двухкомпонентной системы в зависимости от концентрации компонентов и температуры.

Полученные результаты измерения для чистых компонентов растворов были сопоставлены с имеющимися литературными данными.

#### Список литературы

1. Ullmann A., Maevski K., Brauner N. Enhancement of forced and free convection heat transfer rates by inducing liquid-liquid phase separation of a partially-miscible equal-density binary liquid system // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2014. Vol. 70, P. 363-377.
2. Farisè S., Franzoni A., Poesio P., Beretta, G. P. (2013). Heat transfer enhancement by spinodal decomposition in micro heat exchangers // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012. Vol. 42. P. 38-45.
3. Entov L. V., Levchenk V. A., Voronov V. P. Specific Heat of a Liquid Mixture Near the Consolute Point in the Bulk Phase and in a Porous Medium // *International Journal of Thermophysics*. 1993. Vol. 14. No. 2. P.221-229.
4. Фабелинский И.Л., Кривохижа С.В., Луговая О.А., Чайков Л.Л. Купол расслаивания в растворе гваякол-глицерин и просветление гетерогенного раствора под действием механических возмущений // *ЖЭТФ*. 1985. Т.89 . С.85-91
5. Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V. Returning to classic conditions of THW-technique: A device for the constant heating power mode // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2017. Vol. 115, P. 769-773.
6. Rutin S.B., Galkin D.A., Skripov P.V. Comments on “Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids” (*Appl. Therm. Eng.* 105 (2016) 142) // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 129, P.145 – 147.

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда № 19-19-00115,  
<https://rscf.ru/project/19-19-00115/>.*

## УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ВОЛЬФРАМА С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ПАРАМЕТРОВ

Боярских К.А.<sup>1,2,3</sup>, Хищенко К.В.<sup>1,2,3,4</sup>

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

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт,  
Институтский пер., д. 9, г. Долгопрудный, Московская обл., 141701, Россия

<sup>3</sup> Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
пр-т Академика Семенова, д. 1, г. Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия

<sup>4</sup> Южно-Уральский государственный университет,  
пр-т Ленина, д. 76, г. Челябинск, 454080, Россия

E-mail: shagom55@gmail.com

В этой работе получено простое (с малым числом параметров) уравнение состояния вольфрама вблизи области фазового перехода жидкость—пар. Это уравнение состояния получено на основе модели взаимодействующих точечных центров [1]:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+\chi b)}. \quad (1)$$

Здесь  $V$  — удельный объем;  $P$  — давление;  $T$  — температура;  $R$  — удельная газовая постоянная;  $a$ ,  $b$  и  $\chi$  — параметры уравнения состояния.

Расчёт параметров осуществлялся с привлечением экспериментальных данных об изобарическом расширении жидкой фазы вольфрама при высоких температурах [2].

В работе предложен метод определения постоянной изохорной теплоёмкости вещества на основе данных по ударному сжатию исходно пористых образцов.

Проведен расчёт ударных адиабат и изоэнтроп расширения ударно-сжатых исходно пористых образцов вольфрама. Результаты расчётов сопоставлены с данными ударно-волновых экспериментов. На основе согласия результатов расчетов и эксперимен-

тов определена область применимости полученного уравнения состояния.

Также в работе проведены расчёты ударных адиабат для двухфазной смеси жидкость—пар. Исследована гофрировочная неустойчивость ударных волн в этой смеси. Критерии гофрировочной неустойчивости взяты согласно работе [3]. На фазовой диаграмме определена область неустойчивых состояний.

### Список литературы:

1. Петрик Г.Г., Гаджиева З.Р. Однопараметрическое семейство уравнений состояния на основе модели точечных центров и его связь с однопараметрическим законом соответственных состояний // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. № 1. С. 67–78.
2. Коваль С.В., Кускова Н.И., Ткаченко С.И. Исследование механизма электрического взрыва проводников и теплофизических характеристик жидких металлов // ТВТ. 1997. Т. 35, № 6. С. 876–879.
3. Дьяков С.П. Об устойчивости ударных волн // ЖЭТФ. 1954. Т. 27, № 3. С. 288–295.

*Работа поддержана РФФИ (грант № 19-19-00713,  
<https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).*

## ГРАДИЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТА ВИСМУТА

Гаджимогомедов С.Х.<sup>1</sup>, Рабаданов М.Х.<sup>1</sup>, Алиханов Н.М.-Р.<sup>1</sup>, Гаджиев М.Х.<sup>2</sup>, Эмиров Р.М.<sup>1</sup>,  
Палчаев Д.К.<sup>1</sup>, Мурлиева Ж.Х.<sup>1</sup>, Рабаданова А.Э.<sup>1</sup>, Сайпулаев П.М.<sup>1</sup>, Фараджев Ш.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ДагГУ, ул. М. Гаджиева 43а, Махачкала, 367000, Россия,

<sup>2</sup> ОИВТ РАН, ул. Ижорская, д. 13, 125412, Москва, Россия

Изготовление градиентных керамик из одного исходного материала является достаточно сложной задачей [1,2]. В последнее время для этого эффективно применяется [2] методы плазменной обработки поверхности материала, вызывающие широкий спектр химических изменений в контролируемых плазмообразующих средах. Такая плазменная среда обладает достаточной энергией для селективного преобразования поверхностного слоя, не изменяя характеристик в объёме материала.

Проведены серии экспериментов по воздействию потоком плазмы на поверхность керамик составов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$  и  $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$  при  $x = 0 - 0.20$ , варьируя технологическими параметрами и плазмообразующим газом. Наноразмерные порошки составов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{FeO}_3$  и  $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$  синтезированы методом золь – гель и изготовлены на их основе наноструктурированные керамики с заданными свойствами.

Для получения порошков водный раствор нитратов висмута, железа, лантана (или самария) с глицином выпаривался в течение ~1.5 часов при постоянной температуре от ~ 300 °С до ~ 350 °С, и после всплывания осадка в течение нескольких секунд при более ~1000 °С образовывался сыпучий агломерированный порошок. При этом, изменяя объёмную концентрацию дисперсной фазы или внешние параметры (в основном, pH, растворитель, продолжительность реакции, температуру, комплексообразующие соединения) можно получать наноматериалы с заданными характеристиками – структурой, морфологией и фазовым составом. Количество использованного глицина, в качестве комплексообразующего соединения, задаёт характер горения комплекса (геля), и, соответственно, определяет исходный размер частиц, морфологию и фазовый состав продуктов горения. Формирование соответствующих размеров частиц и их распределения обеспечивалось дополнительной термической обработкой. Для предотвращения образования частично спеченных агломератов обработку порошков осуществляли при низких температурах (не выше 500 °С). Оптимальными режимами являлись обработка в течение 30 мин порошков с замещениями La и Sm при температурах 450 °С и 500 °С соответственно. При этом скорости нагревания и охлаждения составляли соответственно: ~ 10 °С/мин и ~ 1 °С/мин (для режима обработки порошков); ~ 7 °С/мин, ~ 1 °С/мин до 400 °С и ~ 6.0 °С/мин с 400 °С до комнатной температуры. Брикетирование исходного сырья осуществлялось при давлениях до ~300 МПа. Размеры керамических образцов составляли: диаметр ~ 6 мм и толщина до ~2 мм. При компактировании порошков из «мягких» агломератов обеспечивается однородность частиц в заготовке и уплотнение её практически до теоретической плотности при спекании. Спекание всех образцов керамик осу-

ществлялось при температуре 600 °С в течение 30 минут. Плазма создавалась плазмотроном постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода. Величина энтальпии и мощность дугового разряда изменяются: от ~5 до ~10 кДж/г и от ~5 до ~15 кВт соответственно. Плазменная струя обеспечивала удельные тепловые потоки на расстоянии от среза сопла до образца: ~15÷25 мм в пределах от 0.05 до 0.2 кВт/см<sup>2</sup> для плазмы аргона и ~20÷40 мм в пределах от 0.2 до 0.5 кВт/см<sup>2</sup> для плазмы азота.

Исследованы морфология, элементный состав, структура и свойства образцов керамик до и после воздействия потоками плазмы аргона и азота. Проведен анализ параметров потоков низкотемпературной плазмы аргона и азота. Воздействие плазмой приводит к структурным трансформациям в приповерхностном слое. В частности, обработка плазмой приводит к формированию высокопористого каркаса (размер пор до ~ 250 мкм), образованного из «оплавленных» зёрен, имеющих монокристаллическое сопряжение, а также на поверхности образца наблюдаются монокристаллические структуры: дендритные и чешуйчатые образования, зёрна с правильной формой “звездочек” с размерами до ~200 мкм; прямоугольные зерна с огранкой примерно - 79,8°; зёрна, образованные из стержней в виде прямоугольников.

Плазменная обработка в средах аргона или азота, изменяет кислородную стехиометрию, определяя в последующем свойства образцов керамики. Задание кислородной стехиометрии предполагает контроль над количеством кислородных вакансий, возникающих во время процесса спекания из-за потери кислорода, приводящий к высокой проводимости [3].

Итак, возникающие под действием плазменного потока интересные модификации поверхности (в основном, структурные трансформация, рекристаллизация зёрен, заполнение дефектов, создание высокой пористости, упрочнения каркаса), в том числе изменения, связанные с кислородной стехиометрией, сильно зависят от градиента температуры в зонах воздействия.

## Список литературы

1. He X. et al. Dielectric performance controlled by magnetic field in PZT-BFO gradient multiferroic ceramics //Ferroelectrics. – 2017. – Т. 514. – №. 1. – С. 158-164.
2. Gadzhimagomedov S. Kh. et al. Superconducting YBCO ceramics after exposure to a plasma flow to a mixture of argon and oxygen // Journal of Physics Conference Series. – 2021. –1923(1). 012007
3. P. Kum-onsa, et al. Effect of complex defects on the origin of giant dielectric properties of Mg<sup>2+</sup>-doped BiFeO<sub>3</sub> ceramics prepared by a precipitation method, Ceram Int. 46 (2020) 25017–25023.

*Работа поддержана РФФИ (грант № 18-08-00092а)  
и Гос. задание FZNZ-2020-0002.*

**ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ПЛЕНКИ 3 - ПОКОЛЕНИЯ**

**Гаджимагомедов С.Х., Палчаев Д.К., Рабаданов М.Х., Мурлиева Ж.Х., Эмиров Р.М., Алиханов Н.М.-Р., Хашава А., Рабаданова А.Э., Сайпулаев П.М., Фараджев Ш.П., Хибиева Л.Р., Шапиев Г.Ш.**

ДагГУ, ул. М. Гаджиева 43а, Махачкала, 367000, Россия  
e-mail: darkusch@mail.ru

Внедрение сверхпроводников состава YBCO, существенно расширит возможности создания компонентов электронной техники, энергетики, космической техники, медицины и т.д. с заданными эксплуатационными характеристиками. При этом хрупкая структура таких керамических сверхпроводников, помимо потерь мощности из-за движения вихрей, ограничивает их использование в двигателях, генераторах, кабелях или катушках. В связи с чем, актуально изготовление сверхпроводников в виде тонких плёнок на длинных гибких металлических подложках-лентах, из которых в последующем создаются сверхпроводящие кабели.

Сверхпроводящая плёнка состава YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> была получена методом магнетронного распыления наноструктурированной мишени на подложке монокристаллического кремния с аморфным слоем SiO<sub>2</sub> [1] при следующих технологических параметрах магнетронного распыления: давление ~4 Па; конфигурация – «off-axis»; подложка расположена под углом α ~ 35° к плоскости мишени; температура подложки ~ 700 °С; ток разряда ~ 200 мА; среда – смесь Ar + O<sub>2</sub> в соотношении 1:2; время – 60 мин. При выбранном режиме распыления скорость роста пленки оставалась ~ 0.6 мкм/ч.

Для изготовления наноструктурированной мишени YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> нанопорошок, термообработанный в течение 20 часов при 910 °С, прессовался под давлением ~ 100 МПа и спекался при 920 °С в течение 1 часа. Плотность мишени, полученной за один этап спекания, порядка ~ 6.0 г/см<sup>3</sup>. Доля сверхпроводящей фазы керамической мишени с индексом кислородной стехиометрии ~ 6.9 составляла не менее 90 %, а температура начала перехода ~ 92 К. Сопротивление керамики при 300 К порядка ~ 9.8·10<sup>-3</sup> Ом·см. Размеры распыляемой мишени составляли: толщина 2–6 мм, диаметр 30–40 мм.

Проведены исследования морфологии скола плёнки на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) «Titan 80-300» в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт». Установлено, что выше аморфного слоя толщиной ~ 10 нм наряду с тетраэдрическими элементами (характерными для SiO<sub>2</sub>) размером ~ 0.5 нм наблюдается несколько областей с некоторым упорядочением. Далее следует плавный переход к нанокристаллическому состоянию плёнки. Образуется наноразмерная блоч-

ная структура осаждаемой плёнки на поздних стадиях роста, ориентированная различным образом. В отличие от микрокристаллической мишени при распылении наноструктурированной мишени на подложке вырастает согласующий слой толщиной примерно 15 нм за счёт самоорганизации наночастиц.

Удельное электросопротивление образцов измерялось четырехзондовым методом на автоматизированной установке на базе приборов Keithley. Показано, что характер проводимости плёнки металлический, значение сопротивления пленки при 300 К составляет ~ 2,6·10<sup>-4</sup> Ом·см, а переход в сверхпроводящее состояние начинается при ~ 78 К.

Итак, показано возможность получения сверхпроводящих пленок состава YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> на диэлектрических подложках без нанесения дополнительных согласующих слоев. При этом наноструктурированность мишени приводит к образованию переходного слоя за счёт самоорганизации наночастиц. Данный метод открывает перспективу изготовления сверхпроводящих лент третьего поколения.

Исследования морфологии скола пленки проводились на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) «Titan 80-300» в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт». Установлено, что выше аморфного слоя толщиной ~ 10 нм наряду с тетраэдрическими элементами (характерными для SiO<sub>2</sub>) размером ~ 0.5 нм наблюдается несколько областей с некоторым упорядочением. Далее следует плавный переход к нанокристаллическому состоянию плёнки. Образуется наноразмерная блочная структура осаждаемой плёнки на поздних стадиях роста, ориентированная различным образом. В отличие от микрокристаллической мишени при распылении наноструктурированной мишени на подложке вырастает согласующий слой толщиной примерно 15 нм за счёт самоорганизации наночастиц.

#### Список литературы

1. Гаджимагомедов С.Х., Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х. и др. Структура и свойства сверхпроводящей пленки состава YBCO/SiO<sub>2</sub>/Si // Вестник Дагестанского государственного университета Серия 1. Естественные науки. 2020. Том 35. Вып. 4, С. 79-89.

*Работа поддержана РФФИ (грант № 18-08-00092а) и Гос. задание FZNZ-2020-0002.*

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ГИДРИДА МАГНИЯ И КАТАЛИТИЧЕСКИХ ДОБАВОК**

Кудияров В.Н., Эльман Р.Р., Курдюмов Н.Е., Пушилина Н.С.

Томский политехнический университет  
e-mail: Kudiyarov@tpu.ru

Хранение водорода в металлгидридных системах является одним из приоритетных направлений развития водородной энергетики. Абсорбция водорода металлами является экзотермическим процессом, вызывающим повышение температуры твёрдого вещества. С более высокими температурами связаны большие значения равновесного давления. В результате движущий потенциал снижается, задерживая время начала и снижая скорость реакции преобразования металла в его гидрид. Кроме того, эффективность работы металлгидридного баллона может снижаться из-за кризиса тепломассопереноса. Следовательно, необходима эффективная система подвода и отвода тепла в системе, чтобы обеспечить возможность использования всего реагента в металлгидридном аккумуляторе. При проектировании металлгидридного баллона наиболее важно рассмотреть теплопередачу от теплообменника к металлгидриду, а также возможные колебания температуры при циклах зарядки/разрядки баллона.

Порошок гидрида характеризуется недостаточной передачей тепла от одной частицы порошка к другой, что может приводить к неравномерному и неполному выходу водорода при разрядке баллона. В таком случае необходимо увеличивать объём соприкосновения порошка гидрида с теплообменником, однако при этом будет уменьшаться количество материала, сорбирующего водород, что негативно скажется на ёмкости баллона. Для решения этих проблем необходимо проанализировать широкий спектр вопросов теплопередачи, связанных с процессом проектирования, чтобы выбрать наиболее подходящую конфигурацию теплообменника. В этой связи, актуальным является разработка и оптимизация теплообменных элементов металлгидридных систем хранения водорода с использованием методов цифрового моделирования.

Другим подходом по улучшению теплопередачи в металлгидридных системах хранения водорода является применение каталитических добавок, которые с одной стороны снижают энтальпию фазообразования и повышают скорость сорбции/десорбции водорода, а с другой стороны повышают теплопроводность металлгидридной засыпки. К таким каталитическим добавкам относятся углеродные нанотрубки, метало-органические каркасные структуры, переходные металлы и их оксиды и многие другие.

В литературе встречаются различные подходы к моделированию процессов сорбции и десорбции водорода, основанные на относительно простых математических моделях, таких как одномерное нестационарное уравнение диффузии или уравнениями тепло- и массопереноса, а также на более сложных, где учитывается изменение удельного объёма металлгидридного слоя. Так как расчёт работы металлгидридных баллонов является сложной научно-

математической проблемой из-за необходимости учёта химических превращений в пористой среде, используется упрощённая математическая модель, позволяющая предусмотреть эксплуатационные характеристики баллона без решения сложных задач теплообмена.

Для решения задач теплопроводности были проанализированы современные платформы, основанные на численных методах решения дифференциальных уравнений с частными производными – методе конечных элементов в частности. В качестве основного инструмента в данной работе был выбран пакет программ *Comsol Multiphysics*, состоящий из обширного семейства удобных, многоцелевых расчётных кодов, имеющих много общего и призванных удовлетворять потребности пользователя в решении обширного круга инженерных задач, в том числе задач теплопроводности.

В настоящей работе с помощью методов цифрового моделирования в пакете программ *Comsol Multiphysics* было исследовано несколько геометрий теплообменника, выполненного из меди. Была определена оптимальная конфигурация теплообменника, а также вычислена скорость заполнения водородом металлгидридного баллона с теплообменником и без него. Приводятся результаты расчётов полей температуры. Оптимизация геометрии теплообменника проводилась с целью получения минимального времени разрядки/зарядки баллона, а также максимального удельного количества тепла, подводимого/отводимого к засыпке металлгидрида. В качестве параметров оптимизации были исследованы такие параметры, как толщина теплообменной трубки, расстояние между трубками (шаг), а также расположение трубок в металлгидридном баллоне.

Рассмотрена модель металлгидридного реактора с материалом-накопителем водорода на основе гидрида магния и различных каталитических добавок. Для улучшения теплопередачи в металлгидридной засыпке рассматривался резистивно нагреваемый стержень с медными дисками разной геометрии. Были рассмотрены диски со сложной геометрией с учётом возможностей изготовления при помощи аддитивных технологий. Также было проведено моделирование течения водорода в свободном объёме и металлгидридной засыпке, а также рассчитана скорость зарядки металлгидридного аккумулятора водорода.

На основании проведённого комплексного изучения методами цифрового моделирования свойств теплообменников выполнена оптимизация металлгидридных систем хранения водорода.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-29-01280).*

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЦЕПТУРЫ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ С ПОМОЩЬЮ ДОБАВОК УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Лысакова Е.И.<sup>1</sup>, Пряжников М.И.<sup>1,2</sup>, Минаков А.В.<sup>1,2</sup>

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

пр. Свободный 79, Красноярск, 660041, Россия

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

пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Качественное проведение операций бурения нефтегазовой скважины во многом зависит от правильного выбора бурового раствора, который должен выполнять ряд сложных функциональных задач [1].

Имеющийся опыт бурения в усложняющихся условиях показывает, что зачастую невозможно удовлетворить всем требованиям, предъявляемым к буровым растворам, используя стандартные добавки. Поэтому в настоящее время активно ведутся исследовательские работы по поиску новых материалов для улучшения свойств буровых растворов. Использование для этих целей разнообразных наноматериалов занимает особое место. Наноматериалы уже продемонстрировали значительный потенциал в регулировании свойств буровых растворов благодаря своим свойствам. В связи с этим в последнее время появилось достаточно большое количество работ, связанных с исследованием влияния нанодобавок на всевозможные характеристики буровых растворов. Показано, что введение сферических наночастиц в буровые растворы и на водной и на углеводородной основе способствует лучшей промывке скважины благодаря увеличению пластической вязкости, снижению фильтрационных потерь благодаря коагуляции низкопроницаемых пород, снижению коэффициента трения между стенкой скважины и буровой трубой, изменению смачиваемости горных пород, снижению коррозионного износа и др [2-4]. В отличие от сферических наночастиц, исследований влияния нанотрубок на основные характеристики буровых растворов значительно меньше. При этом для модификации свойств буровых растворов, как правило, используют многостенные нанотрубки (МУНТ).

Проведенный тщательный анализ литературы показывает, что большинство исследований по модификации свойств буровых растворов с помощью МУНТ посвящены растворам на водной основе. Данные по влиянию добавок МУНТ на характеристики растворов на углеводородной основе достаточно мало. Это объясняется тем, что растворы на углеводородной основе являются гораздо более сложными коллоидными системами и введение в них нанотрубок с получением устойчивых растворов само по себе является достаточно сложной задачей. Между тем с практической точки зрения при бурении в сложных геологических условиях (повышенная температура, высокое поглощение промывочной жидкости, наличие вечной мерзлоты и др.) гораздо эффективнее использовать буровой раствор на углеводородной основе. Поэтому задача совершенствования рецептур буровых растворов на углеводородной основе является наиболее актуальной.

В работе представлены результаты комплексных экспериментальных исследований по влиянию добавок многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) на основные функциональные характеристики буровых эмульсий на основе минерального масла. Подобное систематическое исследование для растворов на углеводородной основе выполнено впервые. Нанотрубками были модифицированы рецептуры типовых буровых растворов с содержанием углеводородной фазы 65%. Массовая концентрация нанотрубок в эмульсиях варьировалась от 0.1 до 0.5 %. Для модификации свойств бурового раствора использовались многостенные нанотрубки Таунит-МД производства компании Нанотех Центр (Тамбов, Россия). Внутренний диаметр этих МУНТ составляет 5–15 нм, а внешний 8–30 нм. Удельная поверхность была выше 270 м<sup>2</sup>, а длина превышала 5 мкм. Количество углеродных слоев составляет 30–40 штук. Исследована реология, фильтрационные и антифрикционные свойства, температурная и коллоидная устойчивость модифицированных МУНТ буровых эмульсий. В целом по итогам исследования было показано, что добавки МУНТ даже в малых концентрациях способны значительно регулировать характеристики буровых углеводородных эмульсий. Добавка МУНТ позволяет в 1.5 раза увеличить эффективную вязкость и повысить предел текучести бурового раствора, в 4 раза уменьшить фильтрационные потери, на 20 % уменьшить коэффициент трения и в 2.7 раз повысить стабильность. Это открывает большие возможности для практического использования МУНТ для управления свойствами буровых растворов на углеводородной основе.

### Список литературы

1. Apaleke A.S., Al-Majed A., Hossain M.E. Drilling fluid: state of the art and future trend / The North Africa Technical Conference and Exhibition. 2012. SPE-149555-MS
2. Mikhienkova E.I., Lysakov S.V., Neverov A.L., Zhigarev V.A., Minakov A.V. Experimental study on the influence of nanoparticles on oil-based drilling fluid properties. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. V. 208. 109452.
3. Minakov A.V., Pryazhnikov M.I., Suleymana Y.N., Meshkova V.D., Guzei D.V. Experimental study of nanoparticle size and material effect on the oil wettability characteristics of various rock types // Journal of Molecular Liquids. 2021. V. 327. 114906
4. Cheraghian G. Nanoparticles in drilling fluid: A review of the state-of-the-art // Journal of Materials Research and Technology. 2021. V. 13. P. 737-753

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ БОРНОЙ КИСЛОТЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОХЛАЖДЕНИЮ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ВВЭР**

Лебевов А.А., Морозов А.В., Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С.

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

пл. Бондаренко 1, Обнинск, 249033, Россия

Особенностью охлаждения реакторных установок ВВЭР в случае аварийной ситуации с разрывом трубопроводов первого контура является подача в активную зону водного раствора борной кислоты для обеспечения повторного залива реактора, а также ввода отрицательной реактивности за счёт наличия в подаваемой воде достаточного количества бора, обладающего высоким сечением захвата тепловых нейтронов [1]. Значение концентрации борной кислоты в подаваемом растворе для современных реакторных установок ВВЭР составляет не менее 16 г/кг и определяется необходимостью обеспечения подкритичности остановленного реактора.

Для обеспечения возможности длительного отвода остаточных энерговыделений от активной зоны в случае аварий, сопровождаемых потерей источников переменного тока, в проектах современных реакторных установок предусмотрено использование пассивных систем безопасности. Например, в реакторе ВВЭР-ТОИ подача борного раствора в активную зону должна осуществляться в течение не менее 72 часов из трех последовательно срабатывающих систем гидроёмкостей [2]. При этом в первый контур поступает 1880 м<sup>3</sup> борного раствора с концентрацией 16 г/кг.

По мере подачи Н<sub>3</sub>ВО<sub>3</sub> из гидроёмкостей в реактор, находящийся в кипящем режиме, происходит рост концентрации борной кислоты в активной зоне, так как масса бора, поступающего из систем пассивного залива, значительно превышает количество, которое уносится за счёт растворимости в образующемся паре [3]. Проведённые оценочные расчёты показали, что концентрация борной кислоты может достигать предельного значения, соответствующего параметрам первого контура при аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода – 450 г/кг. Очевидно, что теплофизические свойства столь высококонцентрированного борного раствора значительно отличаются от характеристик теплоносителя, находящегося в реакторе до момента аварии, так как максимальная концентрация борной кислоты в нем при нормальной эксплуатации не превышает 8 г/кг и определяется задачами борного регулирования. Знание данных свойств необходимо для корректного расчётного моделирования процессов аварийного отвода тепла в реакторной установке. Однако проведенный анализ литературных источников показал отсутствие публикаций с результатами измерения теплофизических свойств водных растворов борной кислоты с такой высокой концентрацией и учётом особенностей водно-химического режима ВВЭР.

В связи с этим, в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» было проведено комплексное экспериментальное исследование теплофизических и физико-химических свойств концентрированных растворов борной кислоты при параметрах, характерных для аварийных режимов

реакторных установок ВВЭР. В ходе данной работы было выполнено измерение следующих свойств борной кислоты: плотности в диапазоне концентраций 2,5–400 г/кг при температуре 298–403 К; кинематической вязкости раствора с концентрацией 2,5–200 г/кг в температурном диапазоне 298–363 К; поверхностного натяжения в диапазоне 2,5–150 г/кг при температуре 298–359 К.

В экспериментах использовалась борная кислота марки ХЧ. В качестве растворителя применялась деионизированная вода, полученная путём прогонки дистиллированной воды через деионизатор. Плотность борных растворов измерялась с помощью пикнометрического метода. Для измерения кинематической вязкости применялся метод капиллярной вискозиметрии. Поверхностное натяжение измерялось методом кольца Дю Нуи с использованием цифрового тензиометра.

Также были выполнены исследования, в которых было изучено влияние на свойства борной кислоты добавки гидроксида калия, применяемого для поддержания необходимого водно-химического режима теплоносителя первого контура ВВЭР.

В результате проведенной обработки полученных экспериментальных данных были получены эмпирические зависимости, описывающие изменения величин плотности, вязкости и поверхностного натяжения водных растворов от концентрации в них борной кислоты.

Также были экспериментально определены значения рН водных растворов Н<sub>3</sub>ВО<sub>3</sub> в диапазоне температур 298–323 К и концентраций 2,5–100 г/кг Н<sub>2</sub>О. Получена зависимость для расчёта константы кислотности борной кислоты.

Полученные результаты позволили существенно расширить диапазон известных свойств концентрированных растворов борной кислоты, а также имеют важное прикладное значение для обоснования безопасности новых проектов водо-водяных реакторов.

## Список литературы

1. Калякин С.Г., Ремизов О.В., Морозов А.В., Юрьев Ю.С., Климанова Ю.В. Обоснование проектных функций системы пассивного залива GE-2 усовершенствованного проекта АЭС с реактором ВВЭР // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2003. № 2, С. 71.
2. Morozov A.V., Pityk A.V., Ragulin S.V., Sahipgareev A.R., Soshkina A.S., Shlepkin A.S. Effect of mass transfer processes on accumulation and crystallization of boric acid in WWER core in emergency cases // J. of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 899, No. 9. 092010.
3. Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С., Морозов А.В. Экспериментальное исследование особенностей растворимости борной кислоты в паре при кипении теплоносителя реактора ВВЭР в случае аварии // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2021, Выпуск 3, С. 167-173.

Магомедов М.М-Ш.

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики филиал ОИВТ РАН  
пр. Имама Шамиля 39а, Махачкала, 367026, Россия

На основе анализа экспериментальных данных представлена обобщённая формула, которая в свою очередь позволит многим учёным получать достоверный и точный материал по теплопроводности водных растворов солей в интервалах давлений  $P_s$  – 100 МПа, температур 293–473 К и концентраций 0–25% (масс.). Приведены расчётные данные о теплопроводности водно-солевой системы  $H_2O+NaCl+MgCl_2+CaCl_2$  при температурах 293–473 К, давлениях  $P_s$  – 100 МПа и концентрациях 0–25% (масс.). Получаемые значения согласуются с экспериментальными данными в пределах 1.6%.

На протяжении многих лет растворы привлекали и продолжают привлекать внимание многих исследователей вследствие той важной роли, которую они играют во всех естественных явлениях в нашей жизни и сложностью и природой, во многом определяемой свойствами жидкой фазы вообще.

На основе анализа формул и данных различных работ по теплопроводности водных растворов неорганических веществ [1, 2, 8–17] получена обобщённая формула для расчёта теплопроводности водных растворов солей [18] в интервалах температур 293–473 К, давлений 0,1–100 МПа и концентрация 0–25 % (масс.)

Исследование, показало, чем больше концентрация электролита, тем меньше её теплопроводность. Также, теплопроводность на изобарах изменяется идентично с повышением концентраций и давлений. Из полученных графиков видно, что с увеличением давления теплопроводность многокомпонентной системы  $H_2O+NaCl+MgCl_2+CaCl_2$  растёт. Теплопроводность на изобарах изменяется идентично с повышением концентраций и давлений, с повышением температуры при постоянном давлении коэффициент теплопроводности возрастает, проходит максимум, а затем уменьшается.

## Список литературы:

- Riedel L. Wärmeleitfähigkeit von wäßrigen Lösungen starker Elektrolute // Chem. Ing. Techn. 1951. № 3. S. 59–64.
- Riedel L. Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Natron- und Kalilauge verschiedener Konzentration und Temperatur // Chem. Ing. Techn. 1950. № 3. S. 54–56.
- Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. Краткий справочник по химии. Пятое издание / Под общей редакцией академика АН УССР А.Т. Пилипенко. Киев.: Наукова думка, 1987. 830 с.
- Варгафтик Н.Б., Осминин Ю.П. Теплопроводность водных растворов солей, кислот и щелочей // Теплоэнергетика. 1956. № 7. С. 11–16.
- Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б. Теплопроводность воды и водных растворов солей // Естественные и технические науки. 2011. № 3(53). С.54–56.
- Kestin J., Khalifa H.E., Abe Y. et al. Effect of Pressure on the Viscosity of Aqueous NaCl Solutions in the Temperature Range 20-150 0C // J. Chem. Eng. Data. 1978. V.23. № 4. P. 328–336.
- Grimes C.E., Kestin J., Khalifa H.E. Viscosity of Aqueous KCl Solutions in the Temperature Range 25-150 0C and the Pressure Range 0–30 MPa // J. Chem. Eng. Data. 1979. V. 24. № 2. P.121–126.
- By Zdenek Losenicky. The Thermal Conductivity of Aqueous Solutions of Alkali Hydroxides // J. Physical Chemistry. 1969. V. 73. № 2. P. 451.
- Dawis P.S., Theeuwes F., Bearman R.J., Gordon R.P. Non-Steady-State, Hot Wire, Thermal Conductivity Apparatus // J. Chem. Phys. 1971. V. 55. № 10. P. 4776–4783.
- Nagasaka Y., Okada H., Suzuki J., Nagashima A. Absolute Measurements of the Thermal Conductivity of Aqueous NaCl Solutions at Pressures up to 40 MPa // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1983. V. 87. № 10. P. 859–866.
- Сафронов Г.А., Косолап Ю.Г., Расторгуев Ю.Л. Экспериментальное исследование коэффициента теплопроводности бинарных растворов электролитов. М., 1990. 28 с. – Деп. ВИНТИ 26.07.90г., № 4262-В 90.
- Пепинов Р.И., Гусейнов Г.М. Экспериментальное исследование теплопроводности водных растворов хлористого калия при высоких температурах // Теплофизика высоких температур. 1991. Т. 29. № 3. С. 605.
- Вахабов И.И., Эльдаров В.С., Якубова И.Н. Теплопроводность растворов системы  $H_2O + MgCl_2 + MgSO_4$  при высоких давлениях // Изв. вузов. Нефть и газ. 1992. № 5. С. 51–53.
- Эльдаров В.С., Вахабов И.И., Ахмедова Р.Э. Исследование теплопроводности трехкомпонентных водных растворов солей  $MgCl_2$  и  $MgSO_4$  // Изв. вузов. Нефть и газ. 1992. № 3-4. С. 65.
- Абдуллаев К.М., Эльдаров В.С., Вахабов И.И., Зулфугаров Д. Ш. Теплопроводность многокомпонентных водных растворов электролитов // Изв. вузов. Нефть и газ. 1992. № 3-4. С. 61–63.
- Эльдаров В.С., Вахабов И.И., Бабаева С.Ш. и др. Анализ работ по теплопроводности многокомпонентных водных растворов солей // Изв. вузов. Нефть и газ. 1992. № 9–10. С. 59.
- Магомедов У.Б. Теплопроводность водных растворов солей при высоких параметрах состояния / В сб.: Геотермия. Геологические и теплофизические задачи. Махачкала: Изд-во Даг. НЦ РАН, 1992. С. 168–187.
- Алхасов А.Б., Магомедов У.Б., Магомедов М. М-Ш. Теплопроводность водных растворов солей при высоких параметрах состояния // Естественные и технические науки. 2011. № 1 (51). С. 23–26.

## БАРИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПЕСЧАНИКОВ РАЗЛИЧНОЙ ПОРИСТОСТИ

Пашук Е.Г., Рамазанова А.Е.

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал объединенного Института высоких температур РАН, пр. Шамиля, 39а, Махачкала, 367030, Россия

В настоящее время наибольшее распространение получили импульсные методы измерения (лазерной и ксеноновой вспышки) теплофизических свойств твёрдых тел. Преимущество этих методов очевидно – полная автоматизация измерений и простота монтажа образцов. Однако ещё на заре развития импульсных методов обращали внимание на то, что к результатам, полученным импульсными методами на гетерогенных и пористых образцах, следует относиться с осторожностью. Дело в том, что только в монокристаллах и плотных поликристаллических и керамических материалах распространение коротких импульсов тепла и квазистационарных потоков будут характеризоваться одинаковыми параметрами. Методы вспышки принципиально требуют использования очень коротких импульсов. Известно, что увеличение длительности импульса тепла до 15 микросекунд приводит к появлению погрешности измерения более 15%. Приходится признать, что наилучшее соответствие измеренных параметров теплопроводности на образцах и в естественных условиях залегания пород будет только при использовании стационарных или квазистационарных методов.

Горная порода – это гетерогенная среда, состоящая из твёрдой фазы (каркаса) разного типа породообразующих минералов, включающая в себя связанные открытые поры, несвязанные закрытые поры и микротрещины. Измерение барической зависимости образцов примерно одинакового состава, но разной пористости позволяет оценить влияние разных видов пористости на теплопроводность песчаника. Использован стационарный метод нагретой пластины в относительном варианте. Для учёта контактных сопротивлений и боковых потерь была измерена теплопроводность эталонного образца. Погрешность измерения определялась по стандартной методике и составила не более 4%.

Предварительно определялись масса, истинная, кажущаяся и общая плотности, открытая и закрытая пористости.

Теплопроводность горных пород при высоких давлениях интересна прежде всего для моделирования процессов теплообмена в пластах горных пород, поэтому методы измерения теплопроводности образцов горных пород должны имитировать условия в пластах. Процессы передачи тепла в пластах весьма инертны, поэтому следует отдать предпочтение стационарным методам измерения.

Исследованы барические зависимости четырёх песчаников различной пористости от давления в диапазоне до 200 МПа. Гистерезис практически отсутст-

вует, данные хорошо описываются линейной аппроксимацией.

Теплопроводность не подверженных сжатию образцов примерно равна теплопроводности каркаса, поскольку теплопроводность газа, заполняющего открытые поры при атмосферном давлении незначительна. Теплопроводность имеет тенденцию к снижению с увеличением пористости, а барический коэффициент – к увеличению. Наличие функциональной связи данных параметров с истинной плотностью и закрытой пористостью позволяет предположить, что теплопроводность не сжатого образца в основном определяется теплопроводностью каркаса, а в увеличении теплопроводности с увеличением давления определяющую роль играет закрытая пористость.

Теплопроводность  $\lambda_0$  имеет тенденцию к снижению с увеличением пористости, а барический коэффициент  $(d\lambda/dP)/\lambda_0$  – к увеличению. Связь этих параметров с закрытой пористостью близка к функциональной ( $R^2=0,927$  и  $R^2=0,974$  соответственно). Наличие функциональной связи параметров  $\lambda_0$  и  $(d\lambda/dP)/\lambda_0$  с истинной плотностью и закрытой пористостью позволяет предположить, что теплопроводность не сжатого образца в основном определяется теплопроводностью каркаса, а в увеличении теплопроводности с увеличением давления определяющую роль играет закрытая пористость.

*Таблица. Результаты измерения образцов песчаника*

Образец	П <sub>общ</sub> , %	П <sub>откр</sub> , %	П <sub>закр</sub> , %	$\lambda_0$ , Вт/мК	$(d\lambda/dP)/\lambda_0$ , 1/ГПа
G2	6,8	4,4	2,35	2,633	1,05
A4	21,3	17,4	3,95	1,300	1,73
B2	13,0	11,3	1,74	2,655	0,54
A2	21,5	17,8	3,70	1,400	1,63

### Выводы

1. Изучена зависимость теплопроводности песчаников различной пористости от давления в диапазоне 0,1...200 МПа стационарным методом нагретой пластины в относительном варианте на автоматизированной установке.

2. Зависимость  $\lambda(P)$  всех образцов практически линейна. Корреляция теплопроводности несжатого образца и барического коэффициента теплопроводности с истинной плотностью и закрытой пористостью образцов близка к функциональной.

3. Сделан вывод об определяющей роли закрытой пористости в увеличении теплопроводности песчаников с увеличением давления.

## ПРОЦЕСС ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В СРЕДЕ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Рамазанова А.Е.<sup>1</sup>, Абдулагатова З.З.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал объединенного Института высоких температур РАН, пр. Шамиля, 39а, Махачкала, 367030, Россия

<sup>2</sup> Дагестанский государственный университет,  
ул. Дзержинского, 12, Махачкала, 367030, Россия

Термодинамические свойства, такие как теплопроводность и температуропроводность являются ключевыми параметрами флюидонасыщенных (нефть, геотермальные флюиды, природный газ и т.д.) пластовых пород и необходимы при разработке ряда важных технологий: в нефтегазовой промышленности, в геотермальной энергетике. Термический метод добычи тяжёлой нефти является традиционным и наиболее успешным методом разработки нефтяных ресурсов. Следовательно, температура в каждой точке пласта и в заданное время (профиль  $T(x, \tau)$ ) очень важна для оценки вязкости нефти и может быть использована для моделирования теплопереноса в пласте. Температурный профиль пласта связан с теплофизическими свойствами пластовой среды, изменяющимися с температурой, т.е. с температурно-зависимыми тепловыми свойствами пласта. Процесс теплопереноса в пласте может быть представлен объединением законов Фурье и сохранения энергии:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla(-\lambda \nabla T) = 0 \quad (1)$$

где  $C_p$  - теплоемкость,  $\alpha = \lambda \rho C_p$  - коэффициент температуропроводности,  $\lambda$  - теплопроводность,  $\rho$  - плотность как функция температуры образца породы-коллектора.

Очевидно, что решение уравнения (1) существенно зависит от температурной зависимости тепловых характеристик пластовой среды. Большинство исследователей из-за отсутствия надежных данных температурных зависимостей  $\alpha(T)$ ,  $C_p(T)$  и  $\lambda(T)$  применяют в уравнении (1) их постоянные значения, что приводит к неточности определения температурного профиля  $T(x, \tau)$  пласта. А это, в свою очередь, влияет на понимание реальных термодинамических условий в пласте. Использование экспериментальных значений теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости и их температурных зависимостей позволяет минимизировать ошибки, возникающие из-за использования постоянных значений параметров для естественного пласта.

Основная цель настоящей работы - предоставить новый набор точных и термодинамически согласованных экспериментальных данных о температуропроводности, теплоемкости и рассчитанных данных

теплопроводности образца природного нефтяного коллектора в широком диапазоне температур.

Уравнение (1) можно представить в упрощенном одномерном виде:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} - a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (2)$$

Решение уравнения (2) позволяет определить пространственное и временное распределение температуры – термодинамическую модель пласта. Для решения данного уравнения использованы измеренные в настоящей работе теплофизические свойства образца-коллектора в зависимости от температуры. Измерения проводились в диапазоне температур от 301.75 К до 823.15 К при атмосферном давлении бесконтактным методом лазерной вспышки.

Уравнение (2) решалось с помощью программы COMSOL – Мультифизическое моделирование. Для проведения расчетов были сделаны предположения и выбраны начальные и граничные условия.

Рассмотрены два случая, когда температуропроводность функция температуры  $\alpha = f(T)$  и  $\alpha = constanta$ . Следует подчеркнуть, что использование постоянного значения  $\alpha = constanta$  вместо её температурной зависимости  $\alpha(T)$  в дифференциальном уравнении (2) приводит к неточности оценки распределения температуры  $T(x, \tau)$  в пласте, а именно, истинная температура пласта гораздо выше, чем в случае, когда  $\alpha = constanta$ . Расчёты показывают, что при использовании постоянных значений температуропроводности и её температурной зависимости в среде пласта между профилями  $T(x, \tau)$  возникает большая разница температур (до 70 градусов).

Такое поведение температурного профиля  $\Delta T(x, \tau)$  хорошо согласуется с температурным поведением температуропроводности. Таким образом, полученный результат показывает, что игнорирование температурной зависимости температуропроводности приводит к изменению значения оценки в пространственном и временном распределении температуры нефтяного пласта.

## СОЗДАНИЕ ТОНКИХ ПЛЁНОК ТИТАН-ГРАФЕН

Сахапов С.З., Сорокин Д.В., Зайцев О.В.

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

Одним из широко используемых и эффективных методов физического осаждения из паровой фазы для выращивания тонких плёнок является магнетронное распыление. Этот метод основан на распылении твёрдой мишени энергичными ионами из тлеющего разряда с усиленным магнитным полем [1]. Метод магнетронного распыления широко используется для получения плёнок из различных материалов, в том числе плёнок сложных многокомпонентных оксидов [2], плёнок на подложках сложной формы [3]. Одной из отличительных особенностей магнетронного разряда является приложенное магнитное поле с напряжённостью около 0.1 Тл, которое служит для удержания вторичных электронов вблизи катода. В прикатодной области электрическое и магнитное поля перпендикулярны друг другу. Результатом является замкнутый дрейф электронов в небольшой области катодного слоя, что приводит к относительно высокой плотности плазмы. Распыление ионов на поверхности мишени играет роль поставщика сырья: распылённые атомы и молекулы с высокой кинетической энергией летят на подложку, где растёт плёнка. Разность потенциалов между электродами магнетрона подаётся от постоянного, импульсного, высокоомощного импульсного и высокочастотного (для диэлектрических мишеней) источников напряжения. Метод магнетронного распыления широко используется для получения плёнок из различных материалов, в том числе плёнок сложных многокомпонентных оксидов и на подложках сложной формы.

Тем не менее, магнетронное распыление постоянного тока имеет ряд недостатков. Во-первых, во время распыления может быть сформирован материал, который не имеет хорошего электрического контакта с поверхностью, которая может быть источником дуги. Во-вторых, часть продукта может быть нанесена на мишень, что снижает скорость осаждения. Для улучшения систем магнетронного распыления используются различные подходы: изменение глубины эрозии; толщина катода; давление, состав и метод времени впуска буфера; величина магнитного поля; расстояние между анодом и катодом, а также их конструкция. Тем не менее, не всегда данный подход может принести ожидаемые результаты. Магнетронное распыление происходит при низких давлениях в рабочей камере, что ограничивает максимальный ток разряда, требует малого расстояния между катодом и анодом для поджига.

Расширение области применения и свойств напыляемых тонких плёнок при магнетронном распылении значительно расширит технологические возможности производства современных контактов для сенсоров, батарей, конденсаторов и защитных покрытий. Также магнетронное распыление, в настоящее время, активно исследуется для создания и модификации анодов, катодов и сепараторов литиевых батарей. Помимо того, что многих задач необходимы покры-

тия с минимальной толщиной поверхности и высокой адгезией, также требуется наибольшая удельная поверхность. Для решения данных проблем используется в основном варьирование параметров газового разряда, состава рабочего газа и мишени, что зачастую не достаточно. Несмотря на то, что катодное распыление изучается довольно давно, рост научных статей, посвященных методам магнетронного распыления, растёт с каждым годом, что связано с растущими потребностями в микроэлектронике, автостроении и космической отрасли. Поэтому новые подходы в данном вопросе актуальны до сих пор.

В данной работе проведены экспериментальные исследования магнетронного распыления в вакуумной камере с малым электродом [4]. В качестве распыляемого материала использовалась мишень чистого титана (Рис. 1). Подложкой являлась кварцевое стекло с нанесенным графеном. Исследовано морфология, состав оптических свойств синтезируемых материалов в зависимости от параметров разряда.

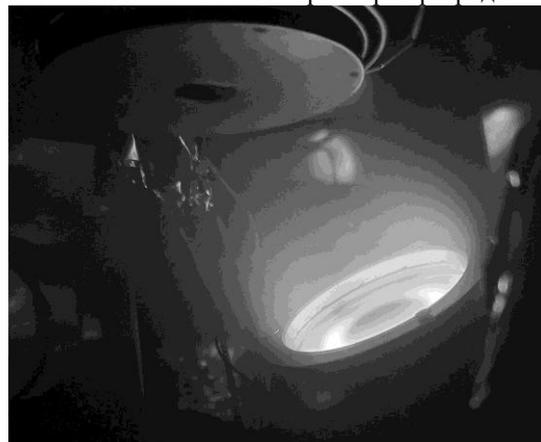


Рис. 1 Фотография свечения плазмы при магнетронном распылении.

## Список литературы

1. Vacuum deposition onto webs, films and foils / С.А. Bishop 2016 UK: William Andrew 602
2. Dhage S.R., Badgujar A.C. Transparent conducting Al:ZnO thin films on large area by efficient cylindrical rotating DC magnetron sputtering // J. Alloys Compd. 2018. V. 763 P. 504-511.
3. Verbeno C.H. Tungsten self-organization nanowires prepared by DC magnetron sputtering // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 464 P.360-366
4. Sakhapov S.Z. Parameters of magnetron sputtering gas discharge plasma with a small anode // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1382 P. 012168

*Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда*

*(грант № 23-29-10130,*

*<https://rscf.ru/project/23-29-10130/>),*

*и соглашения Министерства науки и инновационной  
политики Новосибирской области*

*(соглашение № р-62)*

## УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СПЛАВА ТИТАН—МОЛИБДЕН В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУР

Середкин Н.Н.<sup>1,2,3</sup>, Хищенко К.В.<sup>1,3,4,5</sup>

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Каширское ш., д. 31, г. Москва, 115409, Россия

<sup>3</sup> Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
пр-т Академика Семенова, д. 1, г. Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия

<sup>4</sup> Московский физико-технический институт,  
Институтский пер., д. 9, г. Долгопрудный, Московская обл., 141701, Россия

<sup>5</sup> Южно-Уральский государственный университет,  
пр-т Ленина, д. 76, г. Челябинск, 454080, Россия  
E-mail: nikser12@yandex.ru

Модели термодинамики разных конструкционных материалов представляют интерес для решения фундаментальных и прикладных вопросов теплофизики и физической гидродинамики [1, 2]. Уравнение состояния вещества необходимо для численного моделирования нестационарных гидродинамических процессов при высоких плотностях энергии.

Сплавы титана с молибденом (Ti–Mo) применяются, в частности, в качестве элементов аэрокосмической техники [3].

В настоящей работе представлена модель уравнения состояния для системы сплавов Ti–Mo при высоких давлениях и температурах с учётом массовых долей и уравнений состояния компонентов сплавов.

Уравнения состояния для титана (Ti) и молибдена (Mo) представлены в виде  $E = E(V, T)$  и  $P = P(V, T)$ , где  $E$  — удельная внутренняя энергия;  $P$  — давление;  $V$  — удельный объём;  $T$  — температура. С помощью этих уравнений состояния удельный объём и удельная внутренняя энергия сплава ( $V_{1N}$  и  $E_{1N}$ ) складываются из удельных объёмов и удельных внутренних энергий компонентов ( $V_i$  и  $E_i$ ), умноженных на их массовые доли ( $\alpha_i$ ):

$$V_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(P, T), \quad (1)$$

$$E_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i E_i(P, T). \quad (2)$$

Здесь  $i$  — порядковый номер компонента;  $N$  — количество компонентов сплава.

Результаты расчётов ударных адиабат по уравнениям состояния Ti и Mo согласуются с данными ударно-волновых экспериментов в широкой области плотностей и давлений.

Ударные адиабаты сплавов Ti–Mo с различными массовыми долями компонентов рассчитывались по

модели уравнения состояния (1) и (2), а также другим способом — на основе принципа аддитивности ударных адиабат компонентов [4, 5]:

$$V_{1N}(P) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(P), \quad (3)$$

где удельные объёмы  $V_{1N}$  и  $V_i$  соответствуют состояниям ударного сжатия при давлении  $P$  и рассчитываются по уравнениям состояния компонентов.

Результаты расчётов ударных адиабат сплавов Ti–Mo обоими способами находятся в хорошем согласии, как с имеющимися ударно-волновыми данными, так и друг с другом во всем изученном в эксперименте диапазоне давлений.

Представленные уравнения состояния титана, молибдена и их сплавов могут быть использованы в численном моделировании динамики различных интенсивных импульсных процессов.

### Список литературы

1. Бушман А.В., Канель Г.И., Ни А.Л., Фортов В.Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. Черноголовка: ИХФ АН СССР, 1988.
2. Красюк И.К., Пашинин П.П., Семенов А.Ю., Фортов В.Е. Изучение теплофизических и механических свойств вещества в экстремальных условиях // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 7. С. 593–608.
3. Duan Y., Zhang W., Wang W., Shi L. Studies on mutual diffusion between Mo and  $\alpha$ -Ti during thermal evaporation // Vacuum. 2021. V. 187. P. 110115.
4. Дремин А.Н., Карпунин И.А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // ПМТФ. 1960. № 3. С. 184–188.
5. Алексеев Ю.Ф., Альтшулер Л.В., Крупникова В.П. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // ПМТФ. 1971. № 4. С. 152–155.

*Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00713,  
<https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).*

Смовж Д.В.<sup>1</sup>, Сорокин Д.В.<sup>2</sup>, Комлина С.В.<sup>2</sup>, Бетке И.А.<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия

Графеновое покрытие может рассматриваться как покрытие, регулирующее лиофильность поверхности, для различных приложений, связанных с теплообменными и микроканальными устройствами и в качестве сенсора реагирующего на движение окружающей среды. Моноатомная толщина графенового слоя делает его, с одной стороны, очень чувствительным к окружающему воздействию, с другой стороны, графеновый слой является достаточно прозрачным для потенциалов поверхности, на которой он расположен. Таким образом, получаемые графеновые покрытия представляют собой структуры подложка-графен, свойства которых зависят от материала, морфологии, структуры подложки и от способов нанесения и обработки графенового слоя. Настоящая работа посвящена исследованию влияния графена на изменение контактных углов смачивания поверхности для воды.

Графеновые покрытия полученные методом химического осаждения из газовой фазы [1] наносились на супергидрофильные и супергидрофобные кремниевые и медные подложки, полученные лазерным текстурированием и химической обработкой [2]. Контролировалась морфология поверхности и изменение контактных углов. Типичная морфология поверхности, покрытой графеном представлена на рис.1.

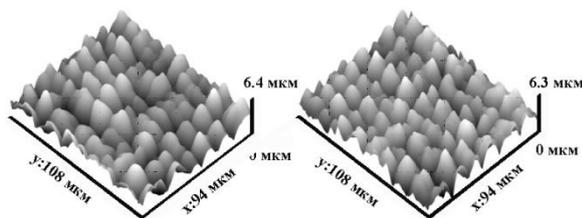


Рис. 1. АСМ изображения текстурированной гидрофильной кремниевой подложки до (слева) и после (справа) нанесения графена.

Показано, что графеновое покрытие уменьшает как гидрофильные, так и гидрофобные свойства образцов, приближая контактный угол к 90 градусам. Для деградирующих поверхностей показано, что графеновое покрытие оказывает пассивирующий эффект, стабилизируя свойства поверхности при экспозиции на атмосфере. После удаления графенового

покрытия свойства поверхности близки к свойствам подложки без контакта с воздушной атмосферой.

В результате исследования влияния графеновых покрытий на смачиваемость поверхностей атомарно гладких (с различной толщиной оксидного слоя) и текстурированных супергидрофильных и супергидрофобных кремниевых подложек, показано что:

- прозрачность графена для смачиваемости изменяется с изменением плотности прилегания графенового покрытия к подложке;
- плотность прилегания, при переносе через воду, зависит от гидрофильности поверхности;
- испарение жидкости для гидрофобной поверхности происходит через дефекты в графеновом покрытии.

Оценки сил, поверхностного натяжения при высыхании жидкости, заключенной между графеном и подложкой, показали, что давление Лапласа может быть достаточно для деформации графенового покрытия.

Таким образом, прозрачностью для смачивания графенового покрытия можно управлять путем использования систем графен – подложка – жидкость с различной лиофильностью друг к другу.

Полученные данные о взаимодействии графенового слоя с различными поверхностями подтверждают современные представления о прозрачности графеновых покрытий по отношению к смачиванию поверхности. Предложенные методы и подходы могут применяться для создания функциональных графеновых покрытий в качестве модификаторов поверхностных свойств материалов, изменяющих их смачиваемость, проводимость (прозрачные электроды, экраны, сенсоры), барьерные свойства (защитные покрытия для электродов и резонаторов различных рядов и СВЧ устройств) и т.д.

#### Список литературы

1. Smovzh D. V. et al. Synthesis of graphene by chemical vapor deposition and its transfer to polymer //Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2020. – V. 61. – №. 5. – P. 888-897.
2. Serdyukov V. et al. Laser texturing of silicon surface to enhance nucleate pool boiling heat transfer //Applied Thermal Engineering. – 2021. – V. 194. – P. 117102.

## НЕКОТОРЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА H<sub>2</sub>O НА БИНОДАЛИ В РАМКАХ ТЕОРИИ РЕНОРМАЛИЗАЦИОННОЙ ГРУППЫ

Рыков С.В.<sup>2</sup>, Кудрявцева И.В.<sup>3</sup>, Устюжанин Е.Е.<sup>1</sup>, Очков В.Ф.<sup>1</sup>, Рыков В.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

<sup>2</sup> Военный институт (инженерно-технический) Военной академии  
материально-технического обеспечения, г. Санкт-Петербург

<sup>3</sup> Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

e-mail: evgust@gmail.com

В данном докладе предлагается система уравнений (СУ), которая включает функции, описывающие свойства воды на линии насыщения (давление,  $p_s$ , плотность пара,  $\rho^-$ , плотность жидкости, производная от давления насыщенного пара,  $p'_s(T)$ , теплота парообразования,  $r$ , и др.). Эта система удовлетворяет требованиям теории ренормализационной группы (РГ), рассмотренной в работе Wang и др. (2013 г.). При построении СУ в рамках теории РГ использованы комплексы ( $\eta = D_{2\beta} / D_{1-\alpha}$ ,  $\phi = D_{2\beta} / D_\tau$ ), которые характеризуют поведение среднего диаметра,  $d_f = (\rho^+ + \rho^-) / (2\rho_c) - 1$ , линии насыщения; последний представлен в форме  $d_f = D_{2\beta} \tau^{2\beta} + D_{1-\alpha} \tau^{1-\alpha} + D_\tau \tau$ , здесь  $\tau = 1 - T / T_c$ ,  $T_c$  – критическая температура, ( $D_{2\beta}$ ,  $D_{1-\alpha}$ ,  $D_\tau$ ) – коэффициенты. Значения характеристик ( $\eta = D_{2\beta} / D_{1-\alpha}$ ,  $\phi = D_{2\beta} / D_\tau$ ) выбраны в соответствии с рекомендациями Wang и др. (2013 г.) для асимметричных систем. Установлено, что оптимальное согласование с исходными данными обеспечивает вариант СУ, содержащий характеристики:  $D_{2\beta} = 0.1$ ,  $\eta = -0.11$  и  $\phi = 0.1$ .

Цель настоящего исследования состоит в том, чтобы построить систему СУ, которая отвечает теории РГ, опирается на уравнение Клапейрона-Клаузиуса и удовлетворяет заданным граничным условиям [1], в том числе:

А) система СУ должна описывать упомянутые свойства H<sub>2</sub>O воды от тройной точки и до критической точки с точностью, которая соответствует точности уравнений, представленных в [1];

В) исходные данные о свойствах, с помощью которых должны вычисляться регулируемые коэффициенты, включенные в СУ, содержат как расчетные данные [2] в интервале  $\tau = 10^{-6} \dots 0.58$ , так и литературные результаты эксперимента при  $\tau = 1.46 \cdot 10^{-3} \dots 0.5$ ;

С) уравнения, входящие в СУ, позволяют получить средний диаметр,  $d_f(\tau)$ , удовлетворяющий условиям РГ.

Отметим, что в [2] для описания термодинамических свойств воды разработаны локальные уравнения, отражающие ( $p_s, \rho^-, \rho^+, T$ ) данные в широком диапазоне температур; наш анализ показал, что указанные локальные функции не отвечают РГ и масштабной теории критических явлений (МТ), в связи с чем соответствующие расчёт-

ные данные имеют существенную погрешность в критической области.

На этапе, посвящённом формированию СУ, привлекаем, во-первых, плотность  $\rho^-(\tau)$ , связанную с модифицированным уравнением Клапейрона – Клаузиуса [1], в виде:

$$\rho^-(T) = \frac{T}{r^*(T)} p'_s(T), \quad (1)$$

где  $r^* = r(1 - \rho^- / \rho^+)^{-1}$  – «кажущаяся» теплота.

Во-вторых, используем  $p_s(\tau)$  [1] в форме:

$$p_s = p_c \exp(-a_0 \tau^2 / t) f(A, \tau), \quad (2)$$

где  $A = (a_i, i = 1 \dots 9)$  – коэффициенты.

В-третьих, применяем  $r^*(\tau)$  в виде

$$r^* = (p_c / \rho_c) f(d, \tau), \quad (3)$$

Где  $d = (d_i, i = 1 \dots 15)$  – коэффициенты.

В-четвёртых, используем плотность  $\rho^+(\tau)$  [1], отвечающую рекомендации РГ, в форме:

$$\rho^+ = \rho_c (1 + f(D, \tau)), \quad (4)$$

где  $D = (D_i, i = 1 \dots 15)$  – коэффициенты.

С использованием методических разработок [1] получен ряд результатов, в том числе связанных с расчётом некоторых термодинамических свойств воды на линии фазового равновесия в критической области.

I. Выбраны численные характеристики СУ (1...4), отвечающие граничному условию  $A$ , в том числе:  $p_c = 22.064$  МПа,  $\rho_c = 321.96$  кг/м<sup>3</sup>,  $T_c = 647.096$  К [2]; индексы ( $\alpha = 0.11$ ,  $\beta = 0.325$ ,  $\Delta = 0.5$ ).

II. Вычислены регулируемые коэффициенты СУ, соответствующие граничному условию  $B$ .

III. Получены необходимые массивы численных данных, в том числе свойства ( $p_s, \rho^-, \rho^+$ ), отвечающие (1, 2, 4). На их основе выполнен сравнительный анализ некоторых результатов.

IV. Исследованы: а) бинодаль в области экстраполяции, б) модели среднего диаметра бинодали.

### Список литературы

1. Wagner W., Pruss A. The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002. V. 31. P. 387-535.
2. Rykov S. V., Kudryavtseva I. V., Rykov V. A., Ustyuzhanin E. E., Ochkov V. F. Analysis of the saturation line on the basis of Clapeyron-Clausius and Gibbs-Duhem equations // Journal of Physics: Conference Series. 2019, J. Phys.: Conf. Ser. V. 1147 012017.

**УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ  
В ЗАДАЧАХ ФИЗИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ****Хищенко К.В.<sup>1,2,3,4</sup>**<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, г. Москва, 125412, Россия<sup>2</sup> Московский физико-технический институт,  
Институтский пер., д. 9, г. Долгопрудный, Московская обл., 141701, Россия<sup>3</sup> Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
пр-т Академика Семенова, д. 1, г. Черноголовка, Московская обл., 142432, Россия<sup>4</sup> Южно-Уральский государственный университет,  
пр-т Ленина, д. 76, г. Челябинск, 454080, Россия

E-mail: konst@ihed.ras.ru

Моделирование физических процессов в веществе при воздействии на него интенсивных потоков энергии требует знания взаимосвязи между термодинамическими параметрами состояния среды в широких пределах. Такую взаимосвязь определяют уравнения состояния. Построение уравнений состояния различных материалов в широком диапазоне от нормальных условий до экстремально высоких давлений и температур представляет интерес для изучения вопросов, связанных с численным решением системы уравнений движения среды в процессах с высокой концентрацией энергии.

Разработка моделей уравнений состояния для обширной области изменения термодинамических параметров теоретическими методами статистической физики встречает серьезные трудности в связи с необходимостью учёта межчастичного взаимодействия в условиях сильной неидеальности разупорядоченной многокомпонентной среды. Для построения широкодиапазонных уравнений состояния материалов традиционно используется полуэмпирический подход, в котором выражения для термодинамических функций выбираются из теоретических представлений, а числовые коэффициенты в этих выражениях опреде-

ляются из условия оптимального описания имеющихся экспериментальных данных.

Тугоплавкие металлы и сплавы на их основе широко используются в качестве элементов конструкций, несущих высокие силовые и тепловые нагрузки. Уравнения состояния этих материалов необходимы для численного моделирования нестационарных гидродинамических процессов в веществе при интенсивных импульсных воздействиях.

В настоящей работе дается краткий обзор полуэмпирических моделей термодинамики тугоплавких материалов в широком диапазоне изменения удельных объемов, температур и давлений. Приводятся примеры расчёта термодинамических характеристик титана, ванадия, хрома и других металлов в сопоставлении с имеющимися экспериментальными данными при высоких плотностях энергии.

Представленные уравнения состояния могут быть использованы в численном моделировании различных процессов в тугоплавких металлах и сплавах на их основе при решении задач физической гидродинамики.

*Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00713,  
<https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).*

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНО- И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ ФЕРРИТА ВИСМУТА****Шапиев Г.Ш.<sup>1</sup>, Палчаев Д.К.<sup>1</sup>, Алиханов Н.М.-Р.<sup>1</sup>, Мурлиева Ж.Х.<sup>1</sup>, Рабаданов М.Х.<sup>1</sup>, Каллаев С.Н.<sup>2</sup>, Омаров З.М.<sup>2</sup>, Бакмаев А.Г.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Дагестанский государственный университет,  
ул. М. Гаджиева, д.43-а, Махачкала 367000, Россия<sup>2</sup> Институт Физики ФНИЦ РАН, ул. М.Ярагского, 94, 367015 Махачкала, Россия

Мультиферроики привлекают особое внимание исследователей в связи с широкими перспективами создания на их основе различных технологических устройств. Среди них особое место занимает феррит висмута ( $\text{BiFeO}_3$ ), в котором сегнетоэлектричество и антиферромагнетизм сосуществуют в одной области температур ( $T_C \sim 830$  °С и  $T_N \sim 370$  °С). Уникальные свойства  $\text{BiFeO}_3$  и материалов на его основе открывают возможности для применения в различных магнитоэлектрических устройствах, спинтронике, сенсорной технике и магнитной памяти.

Получение нанокерамики осуществлялось по следующей схеме. Исходные реагенты  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  (мольное соотношение  $\text{Bi}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  1: 1, чистота > 98%) растворяли в дистиллированной воде. К смеси добавляли глицин ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ , чистота > 98%), в качестве топлива. Раствор выпаривали при  $\sim 300$  °С в течение 1,5 часов при перемешивании магнитной мешалкой для гомогенизации. Образовавшийся в результате гель самовоспламенялся с выделением газов и образованием нанопорошка. В исходном порошке (после синтеза), обычно, содержится  $\sim 4\%$  сопутствующих фаз  $\text{BiFeO}_3$  с размером частиц 35 нм. После прокаливании на воздухе, в течение 30 минут при 600 °С (скорость нагрева 5 °С в минуту), сопутствующие фазы в этом порошке исчезают с образованием 100% нанокристаллической фазы  $\text{BiFeO}_3$  с размером частиц  $\sim 50$  нм. Для исследования теплофизических свойств керамические образцы из синтезированного порошка получали методом искрового плазменного спекания (SPS) при 600 °С под давлением  $\sim 60$  МПа в течение 3 минут. Плотность нанокерамик составляла 6,51 г/см<sup>3</sup>, средний размер частиц  $\sim 38$  нм. После спекания керамика состоит из зерен, представляющих собой агломераты наночастиц.

Микроразмельченный порошок получали сухим помолом оксидов железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и висмута ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) (мольное соотношение  $\text{Bi}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  1: 1). Далее они смешивались в агатовой ступке, с использованием бутилового спирта, прессовались в брикеты под давлением 300 МПа и помещались в разогретую до  $\sim 850$  °С печь. При этой температуре брикет выдерживался примерно  $11 \pm 1$  минут, после чего он резко сбрасывался на массивную медную пластину, находящуюся при комнатной температуре. Из девяти полученных таким способом образцов, пять растрескались, как правило, те, кото-

рые содержали большее количество сопутствующих фаз в результате распада  $\text{BiFeO}_3$ . На дифрактограммах этих керамик большая ширина пиков указывала на то, что их остовам характерны высокие механические напряжения. После помола этих образцов ширина пиков значительно снизилась. В дальнейшем эти деградированные образцы размалывались и использовались для компактирования с нанопорошком. Четыре образца без признаков растрескивания, согласно дифрактограммам, содержали не менее 98% фазы  $\text{BiFeO}_3$ . Их плотность составляла  $\sim 5,6$  г/см<sup>3</sup>.

Результаты исследования показывают, что абсолютные значения теплоемкости у нанокристаллической керамики примерно на 9% выше, чем у микрокристаллической. Такая разница свидетельствует о наличии дополнительного вклада в энтальпию, обусловленного высокой поляризацией наночастиц, образованием агломератов из них и повышением эффекта адсорбции воздуха наэлектризованными наночастицами. Снижение размеров частиц ниже 62 нм, приводит к тому, что фаза  $\text{BiFeO}_3$ , наряду с сегнетоэлектрическими свойствами, приобретает ферромагнитные, благодаря разрушению антиферромагнитной циклоиды. Температуры, на которые приходится магнитные переходы нано- и микрокерамик, различаются лишь на 2 К. При этом для нанокерамики высота пика значительно выше, что связано с повышением магнитной составляющей теплоемкости. Температурные зависимости температуропроводности и теплопроводности демонстрируют явную нерегулярность до ферромагнитного фазового перехода.

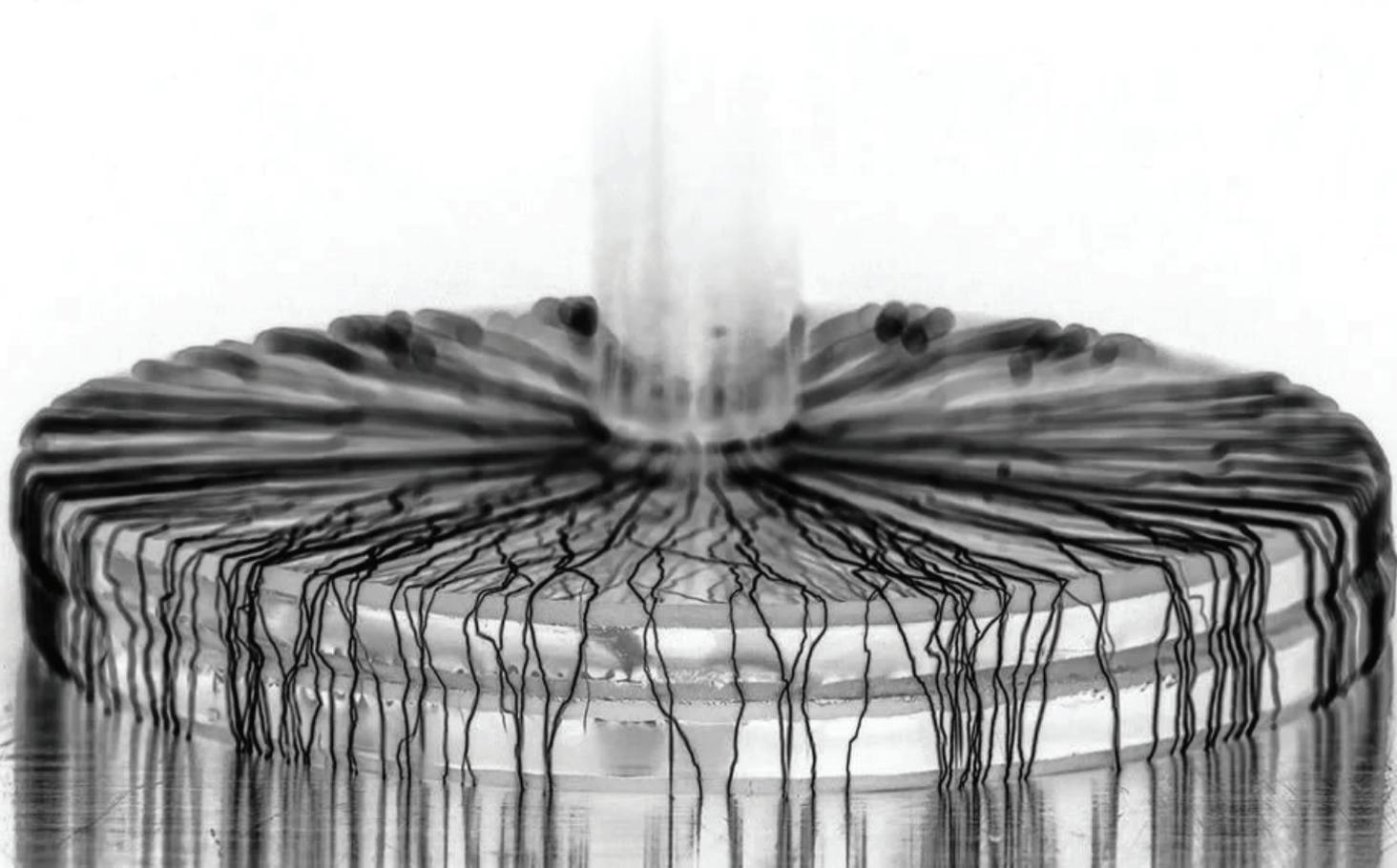
Уменьшение размеров частиц  $\text{BiFeO}_3$  ниже 62 нм переводит их из полидоменного в монодоменное сегнетосостояние, что несколько снижает эффект спонтанной поляризации. В связи с чем, была предпринята попытка обеспечить оптимальные сегнетомагнитные свойства путем получения керамик  $\text{BiFeO}_3$  компактированием нано- и микрочастиц. При этом обнаружилось, что это позволяет и решить проблему снижения содержания сопутствующих фаз  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$  и  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  в микрокристаллических материалах, полученных синтезом из жидкой фазы и методом обычной технологии.

*Работа выполнена в рамках Гос. задания FZNZ-2020-0002.*



# СЕКЦИЯ 9

## Электрофизические явления в газовых и жидких средах





Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Яландин М.И.

Институт электрофизики УрО РАН,  
ул. Амундсена 106, Екатеринбург, 620016, Россия

Под убегающими электронами (УЭ) традиционно понимают свободные электроны в газе или плазме, которые теряют в столкновениях с частицами среды меньше энергии, чем получают под действием приложенного электрического поля и, как следствие, непрерывно ускоряются [1]. В однородном электрическом поле переход электронов в режим убегания происходит при превышении напряжённости поля определённого порогового значения (для азота атмосферного давления это примерно 270 кВ/см). В лабораторных исследованиях по субнаносекундному импульсному пробую газовых промежутков зачастую используются конфигурации электродов, обеспечивающие резко неоднородное распределение электрического поля. Его напряжённость у катода более чем на порядок выше среднего значения, что существенно влияет на характер убегания электронов [2].

В настоящей работе анализируются особенности убегания электронов в резко неоднородном электрическом поле, обусловленном использованием конического катода (см., например, эксперименты [3]). Поле спадает с удалением от катода по степенному закону  $E \propto z^{\gamma-1}$ , где  $\gamma$  – показатель неоднородности поля. При варьировании угла раствора конуса  $\alpha$  от  $0^\circ$  (тонкая игла) до  $180^\circ$  (плоскость) показатель неоднородности поля пробегает интервал  $0 \leq \gamma \leq 1$ .

Установлено, что динамика УЭ радикально отличается для углов в интервалах  $98.6^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$  (слабо-неоднородное поле с  $0.5 \leq \gamma \leq 1$ ) и  $0^\circ \leq \alpha \leq 98.6^\circ$  (сильно-неоднородное поле с  $0 \leq \gamma \leq 0.5$ ). В первом случае ускоряющая электрон электрическая сила на периферии  $z \rightarrow \infty$  доминирует над тормозящей его силой трения. Это означает, что если стартующий с острия  $z = 0$  электрон перешел в режим убегания в прикатодной области, то он будет продолжать непрерывно ускоряться при любых  $z$ . Во втором случае на периферии  $z \rightarrow \infty$  доминирует сила трения. Тогда на достаточно большом расстоянии от катода электрон начнет тормозиться и станет тепловым. Такое различие в динамике электронов приводит к необходимости использования различных критериев убегания.

Традиционный критерий предполагает непрерывное ускорение электрона во всем межэлектродном промежутке. Соответствующие результаты расчётов порогового для убегания электронов значения напряжения  $U$  для промежутка длиной 7.5 мм (газ – азот атмосферного давления) показаны на рис. 1 сплошной линией: зависимость  $U_c(\gamma)$ . Пороговое значение напряжения предсказуемо оказывается максимальным ( $\approx 200$  кВ) для случая однородного поля с  $\gamma = 1$ . С уменьшением  $\gamma$  растёт степень неоднородности поля, что обеспечивает более удобные для перехода электронов в режим убегания стартовые условия у катода. Казалось бы, это должно приводить к

монотонному снижению  $U_c$ . Такое снижение (до 24.9 кВ) действительно происходит в области больших  $\gamma$ , но затем напряжение  $U_c$  начинает расти, достигая значения в 40.4 кВ при  $\gamma = 0$ .

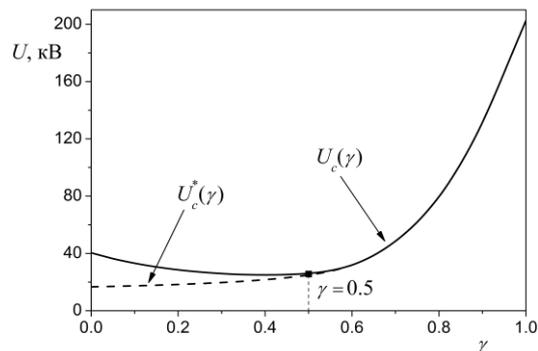


Рис. 1. Зависимости порогового для убегания электронов значения напряжения от показателя неоднородности поля для двух различных критериев убегания. Сплошная линия соответствует непрерывному ускорению электрона в газовом промежутке. Штриховая линия – достигнуто быстрым электроном анода с энергией в 100 эВ.

Аномальный характер зависимости  $U_c(\gamma)$  в области малых  $\gamma$  обусловлен торможением электронов на периферии. В этой области нам представляется более корректным использование альтернативного критерия убегания электронов, не требующего их непрерывного ускорения. В случае регистрации на аноде быстрых электронов (будем считать электроны быстрыми, если их энергия превышает 100 эВ) для наблюдателя не имеет значения, ускорились ли электроны в межэлектродном промежутке непрерывно, либо имелись области, где они тормозились. Соответствующая зависимость порогового напряжения от показателя неоднородности поля  $U_c^*(\gamma)$  показана на рис. 1 штриховой линией. Видно, что для больших  $\gamma$  оба критерия дают практически совпадающие значения напряжения,  $U_c \approx U_c^*$ . Для малых  $\gamma$  кривые  $U_c(\gamma)$  и  $U_c^*(\gamma)$  заметно расходятся. Так, для бесконечно тонкого конуса ( $\gamma = 0$ ) пороговые напряжения радикально – более чем в 2.4 раза – отличаются.

#### Список литературы

1. High-energy phenomena in electric discharges in dense gases / L.P. Babich. Futurepast, Arlington, TX, USA, 2003.
2. Zubarev N.M., Zubareva O.V., Yalandin M.I. Features of electron runaway in a gas diode with a blade cathode // Electronics. 2022. V. 11, N 17. P. 2771.
3. Mesyats G.A., Osipenko E.A., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I., Zubarev N.M. An ultra-short dense paraxial bunch of sub-relativistic runaway electrons // IEEE Electron Device Lett. 2022. V. 43, N 4. P.627–630.

Исследование выполнено за счет гранта  
РНФ (проект № 23-19-00053).

Зубарева О.В.<sup>1</sup>, Зубарев Н.М.<sup>1,2</sup>, Яландин М.И.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт электрофизики УрО РАН,  
ул. Амурдсена 106, Екатеринбург, 620016, Россия<sup>2</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Ленинский пр-т. 53, Москва, 119991, Россия

В достаточно сильном внешнем электрическом поле свободные электроны в газе при столкновениях с частицами среды теряют меньше энергии, чем получают от поля, и способны непрерывно ускоряться. Такие электроны принято называть убегающими электронами (УЭ) [1,2]. Их скорость сопоставима со скоростью света. Они пересекают газовый промежуток длиной в единицы-десятки миллиметров за десятки-сотни пикосекунд, осуществляя предварительную ионизацию промежутка и инициируя его пробой в субнаносекундном временном диапазоне.

В однородном электрическом поле переход электронов в режим убегания происходит при превышении напряжённости поля определенного критического значения, которое зависит от вида газа и его давления. В лабораторных условиях в экспериментах с УЭ, как правило, используют электроды с формой, обеспечивающей неоднородное распределение электрического поля – его напряжённость в промежутке меняется более чем на порядок. Это значительно влияет на динамику убегания электронов [3,4].

В данной работе мы рассматриваем особенности убегания электронов в газовом диоде с клиновидным катодом. Оказывается, что характер и условия убегания существенно отличаются для клиньев с большими и малыми углами раствора, т.е. фактически при различной степени неоднородности поля. Поведение УЭ в случае клиновидного катода с относительно большими углами раствора, превышающими 30 градусов, в целом аналогично поведению электронов в однородном поле. Возможность их перехода в режим убегания и последующее ускорение во всем газовом промежутке полностью определяется локальными процессами в области их старта, т.е. вблизи вершины клиновидного катода. Для острого клина, угол раствора которого меньше 30 градусов (сюда относятся и случай лезвийного катода), условия убегания принимают нелокальный характер. Они уже не будут определяться локальным распределением электрического поля вблизи катодной кромки. Относительный вклад силы торможения электронов в газе увеличивается с удалением от катода, и поведение электронов около анода будет играть ключевую роль в анализе условий убегания (см. рис. 1). Электрон, который перешел в режим убегания вблизи катода, на периферии, в области слабого электрического поля может начать тормозиться и, в итоге, превратиться в тепловой около анода. Поэтому при рассмотрении возможности непрерывного ускорения электрона во всем газовом промежутке необходимо учитывать баланс действующих на него сил в прианодной области. При этом нелокальность рассматриваемых процессов проявляется в том, что сила, действующая на электрон вблизи анода, зависит от того, с какой энергией он достигает анода, а для определения этой

энергии необходимо учитывать всю предысторию его движения.

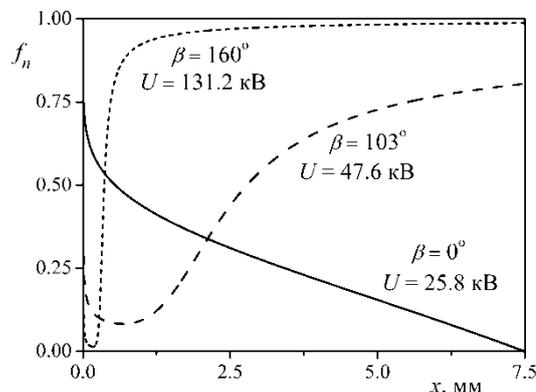


Рис.1. Распределение приведенной силы, действующей на убегающие электроны, для разных углов раствора клиновидного катода и соответствующих им околопороговых напряжений (межэлектродное расстояние 7.5 мм; атмосферный воздух).

Также, в связи с недавними экспериментами [5,6] по управлению потоками УЭ в воздушных зазорах посредством внешнего ведущего магнитного поля, анализируется его влияние на геометрию области вблизи вершины клина, стартующие из которой электроны будут убегать. Эта область начинает заметно деформироваться – уменьшаться – при значениях магнитной индукции в единицы тесла.

#### Список литературы

1. Гуревич А.В., Зыбин К.П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // УФН. 2001. Т. 171, № 11, С. 1177–1199.
2. High-energy phenomena in electric discharges in dense gases / L.P. Babich. Futurepast, Arlington, TX, USA, 2003.
3. Zubarev N.M., Yalandin M.I., Mesyats G.A., Barenholtz S.A., Sadykova A.G., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Zubareva O.V. Experimental and theoretical investigations of the conditions for the generation of runaway electrons in a gas diode with a strongly nonuniform electric field // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. P. 284003.
4. Zubarev N.M., Zubareva O.V., Yalandin M.I. Features of electron runaway in a gas diode with a blade cathode // Electronics. 2022. V. 11, N 17. P. 2771.
5. Гашков М.А., Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Месяц Г.А., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. Компрессия потока убегающих электронов в воздушном зазоре с неоднородным магнитным полем // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 113, № 6. С. 370–377.
6. Mesyats G.A., Osipenko E.A., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I., Zubarev N.M. An ultra-short dense paraxial bunch of sub-relativistic runaway electrons // IEEE Electron Device Lett. 2022. V. 43, N 4. P. 627–630.

Исследование выполнено за счет гранта  
РНФ (проект № 23-19-00053).

## О ВОЗНИКНОВЕНИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ПУЗЫРЬКАХ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ И ДЕЙСТВИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Коробейников С.М., Бобровская С.С., Красильникова Е.А.

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

В настоящее время состояние изоляции высоковольтного оборудования оценивают в основном по уровню интенсивности частичных разрядов (ЧР). Для качественной оценки необходимо знать характер возникновения ЧР. В свободно плавающих пузырьках трудно возникнуть разряду, т.к. появление первого, т.н. инициирующего электрона весьма затруднительно. Так, например, при напряжении, примерно в три раза превышающем напряжение, при котором должен возникнуть разряд в газе пузырька, время ожидания этого разряда превышает 10 минут, а при небольшом уменьшении напряжения - разряд может произойти при экспозиции, превышающей несколько часов.

Поэтому были проведены эксперименты по инициировании разряда в гелиевых пузырьках с помощью рентгеновского излучения [1]. Однако механизм появления разряда остался неизвестным. Были выдвинуты предположения о появлении инициирующего электрона за счёт ионизации молекул гелия или же поверхностных атомов пузырька. Цель данной работы – предварительная проверка достоверности предложенных гипотез о появлении инициирующего электрона.

Можно показать, что вероятность первого варианта должна быть пропорциональна объёму сегмента шарообразного пузырька (Рис.1), а второго варианта - площади поверхности сегмента. Только электроны, образованные здесь могут привести к ЧР, т.е. для них будет выполнено основное требование  $U > U_p$  (напряжение пробоя по Пашену) при соответствующем напряжении.

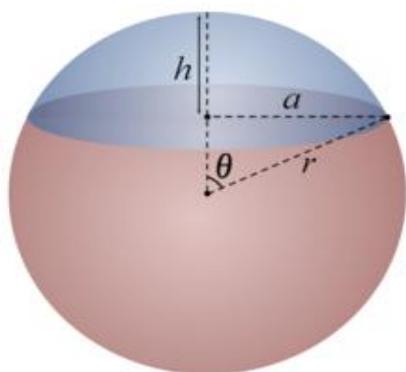


Рис. 1. Сегмент сферического пузырька, генерирующий инициирующий электрон:  $h$  – высота сегмента;  $a$  – радиус основания сегмента;  $r$  – радиус.

Этот объём равен удвоенному объёму шарового сегмента, показанному на Рис. 1.

$$V = \frac{2\pi}{3} \left( 3R - \frac{l}{2} \right)^2 \left( 2R + \frac{l}{2} \right) = \frac{\pi}{12} (2R - l)^2 (4R + l)$$

Здесь  $l$  – минимальное расстояние в пузырьке, при котором еще возможен пашеновский механизм, его можно выразить через напряжение пробоя по Пашену и напряжённость поля.

А площадь поверхности также выражается через эти параметры  $W \sim 2\pi R(R-l/2)$

Далее учитываем, что напряжение меняется по синусоидальному закону  $U = U_m \sin \omega t$ , поэтому следует учесть, что условия, соответствующие возможности пробоя, возникают в некотором временном диапазоне, зависящим от амплитуды напряжения. Поскольку импульс рентгеновского излучения возникает с частотой 7 Гц и он случайно попадает в этот интервал. Поэтому вероятность должна быть пропорциональна интегралу по времени, в диапазоне времени, когда выполняется условие пробоя. На основе этих предположений была построена математическая модель, которая даёт возможность оценки поведения вероятности разряда в зависимости от напряжения.

На Рис. 2 представлены расчётные графики изменения вероятности разряда от напряжения. Здесь же точками обозначены экспериментальные данные [1].

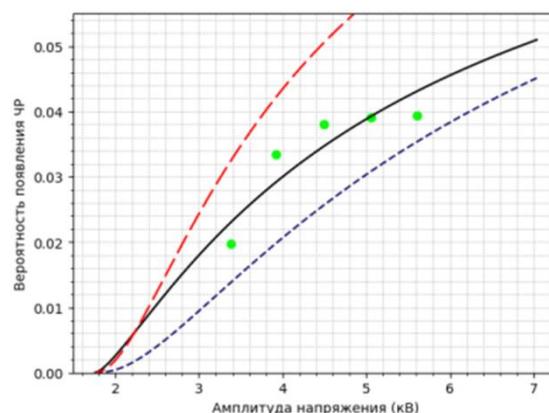


Рис. 2. Зависимость вероятности пробоя пузырька от напряжения: точки - данные эксперимента [1]; синий – расчёт по ионизации газа в пузырьке; красный – расчёт по возникновению стримера.

Сравнивая полученные зависимости, можно увидеть, что значительной разницы между механизмами не выявлено, появление инициирующего электрона в результате ионизации молекул газа является предпочтительным.

### Список литературы

1. S. M. Korobeynikov, A. V. Ridet, M. N. Lyutikova Experimental studies of partial discharges in bubbles exposed to X-ray radiation // IEEE 22 International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM) : proc., Altai Region, 30 June – 4 July 2021. – Novosibirsk

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРНЫХ ТЕМПЕРАТУР БАЗОВОГО ЭЛЕМЕНТА ТИПИЧНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ В РЕЖИМЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Кузнецов Г.В., Кравченко Е.В.

Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск, 634040, Россия

Возможное использование электрохимических систем накопления энергии (СНЭ) при энергопереходе на ветрогенераторы и солнечные электростанции потребует от производителей АКБ проводить оценки и указывать тепловые характеристики батарей наряду с энергетическими параметрами [1].

Достаточно многочисленные в последнее время возгорания и взрывы разного рода аккумуляторных батарей (на воздушных и подводных судах, электромобилях, электросамокатах) иллюстрируют недостаточную информативность опытно-конструкторских работ по проектированию и созданию таких аккумуляторов, в частности, интерпретации тепловых режимов работы такого рода накопителей энергии.

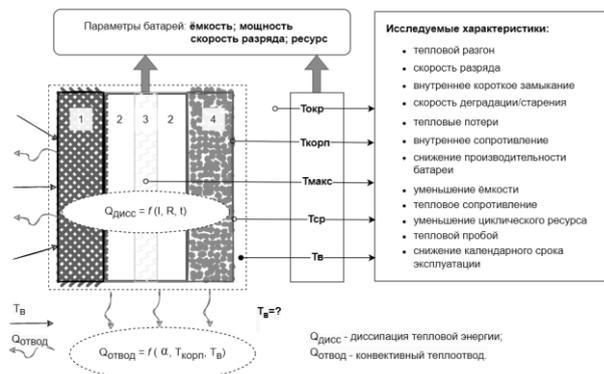


Рис. 1. Характерные температуры, применяемые при анализе характеристик работы электрохимических источников тока.

Анализ большой группы механизмов и факторов (см. рис.1), ускоряющих деградацию характеристик и параметров электрохимических батарей, указывает на существенное значение релевантной оценки характерных температур. Как известно, большинство химических реакций имеют экспоненциальную зависимость от температуры, в том числе и в электрохимических накопителях энергии. Поэтому для обеспечения требуемого теплового режима их работы проводится оценка характерных температур электрохимических систем хранения электрической энергии с применением инструментальных измерений и методов математического моделирования [2]. Поэтому в данной работе используется электротермическая тепловая модель в двумерной постановке.

На рисунке 2 представлены результаты численного анализа характерных температур базового элемента свинцово-кислотной батареи для типичного значения удельной емкости 22 А·ч. и теплообмена с воздухом зазора при  $\alpha=5$  и  $\alpha=10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $T_{\text{в}}=20$  °С.

Установлено (рис.2), что при интенсификации режима работы электрохимического накопителя (при сокращении времени заряда) наблюдается рост ха-

рактерных температур при всех значениях коэффициентов  $\alpha$ .

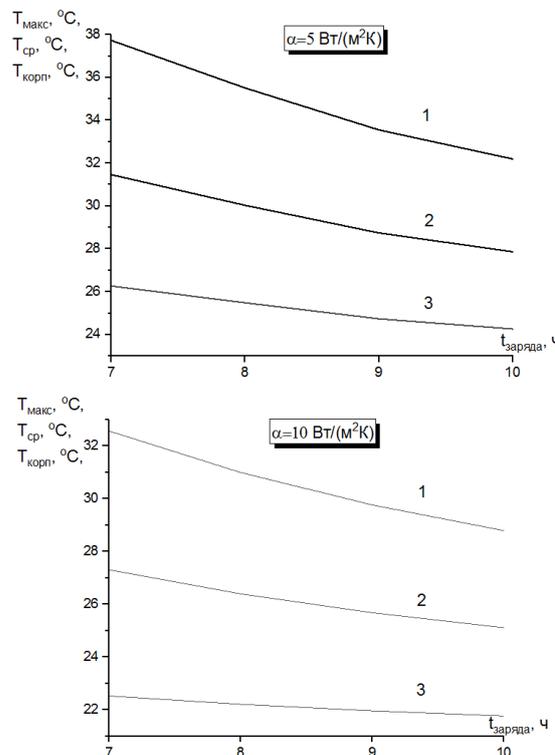


Рис. 2. Характерные температуры базового элемента свинцово-кислотной батареи для различных режимов и условий его теплообмена с воздухом зазора при  $T_{\text{в}}=20$  °С:

- 1 – максимальная температура базового элемента;
- 2 – средняя температура базового элемента;
- 3 – температура корпуса базового элемента.

Безопасная эксплуатация электрохимических АКБ при охлаждении базового элемента АКБ в режиме естественной конвекции зависит от определения характерной температуры процесса накопления и генерации электрической энергии батареей. Установлено, что характерная максимальная температура ( $T_{\text{макс}}=36$  °С) базового элемента типичной АКБ превышает допустимый диапазон для свинцово-кислотных батарей уже при  $\alpha=5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и  $T_{\text{в}}=20$  °С.

При этом необходимо отметить, что в тоже время температура корпуса остаётся в допустимом интервале ( $T_{\text{корп}} \leq 26$  °С) при прочих равных условиях.

### Список литературы

1. Кравченко Е. В. Обзор современных технологий накопления энергии // Компетентность. – 2023. – № 1. – С. 33-38.
2. G.V. Kuznetsov, E.V. Kravchenko. Evaluation of the limiting conditions for operation of a large electrochemical energy storage system. Journal of Energy Storage, Volume 65, 2023, 107384, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107384>.

## ТЕПЛОТДАЧА С ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА ПРИ РАЗРЫВЕ ТОНКОЙ ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Куперштох А.Л., Медведев Д.А., Альянов А.В.

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

Охлаждение нагреваемых поверхностей путём испарения капель и плёнок жидкости более эффективно при наличии множества контактных линий [1]. Для разрыва тонких плёнок можно использовать неоднородное электрическое поле, создаваемое непроводящими вставками в разрезные электроды [2, 3]. В данной работе исследуется процесс интенсификации теплоотдачи с поверхности подложки при разрыве жидкой диэлектрической плёнки. Для компьютерного моделирования использовался вариант метода решёточных уравнений Больцмана D2Q9 с учётом переноса тепла за счёт конвекции и теплопроводности, а также скрытой теплоты фазовых переходов на границах жидкость-пар [4]. Использовалось уравнение состояния Ван-дер-Ваальса.

Решалась двумерная задача о деформации первоначально плоской плёнки жидкого диэлектрика начальной толщиной  $\delta = 30$ , лежащей на нижнем электроде с непроводящей вставкой размером  $2R = 60$  при нейтральном смачивании. Задавалась начальная температура во всей области  $T = 0.7T_{кр}$  и нулевая начальная скорость вещества. После установления равновесия между плёнкой жидкости и паром ( $t = 5000$ ) включался мгновенный нагрев нижнего электрода до температуры  $T = 0.75T_{кр}$ , а на верхней границе области происходило охлаждение конденсата до температуры  $T = 0.6T_{кр}$ .

Модифицированное электрическое число Бонда [3] зависит от толщины плёнки  $\delta$  и от характерного радиуса изоляционной вставки  $R$ :

$$Bo_E^* = \varepsilon_0(\varepsilon_l - 1)E_0^2 R^2 / (\rho_l \sigma).$$

Здесь  $E_0$  – начальная напряжённость электрического поля над поверхностью плёнки,  $\varepsilon_l$  – диэлектрическая проницаемость жидкости, а  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

На рис. 1 показаны зависимости от времени теплового потока с поверхности электрода без электрического поля (кривая 1) и после включения электрического поля (кривая 2).

По мере уменьшения толщины плёнки поток тепла постепенно увеличивается. После включения электрического поля при  $t = 12000$  тепловой поток сразу возрастает, что связано с ускорением процесса испарения плёнки. Под действием неоднородного электрического поля плёнка жидкости в области непроводящей вставки (рис. 2) начинает становиться всё тоньше и тоньше [2, 3]. При этом градиент температуры локально увеличивается, и тепловой поток начинает возрастать сильнее (рис. 1). В момент перед разрывом плёнки полный тепловой поток возрастает

более чем в два раза. При этом в области вставки будет происходить локальное охлаждение подложки.

После разрыва плёнки теплоотдача от сухого пятна резко падает ( $t > 30600$ ), так как коэффициент теплопроводности пара гораздо меньше теплопроводности жидкости (в наших расчетах в 20 раз). Соответственно, уменьшается и полный поток тепла (рис. 1).

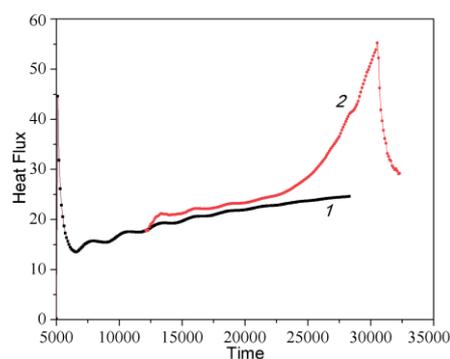


Рис. 1. Зависимость полного теплового потока с поверхности электрода без электрического поля (1) и после включения электрического поля (2). Размеры расчетной области  $400 \times 200$ . Электрическое число Бонда  $Bo_E^* = 3$ .



Рис. 2. Деформация плёнки жидкого диэлектрика при воздействии неоднородного электрического поля в процессе перфорации.  $t = 28000$ .

Таким образом, с помощью перфорации тонких плёнок жидкого диэлектрика в неоднородном электрическом поле можно создавать условия для импульсного охлаждения локальной области на подложке.

### Список литературы

1. Marchuk I., Karchevsky A., Surtaev A., Kabov O. Heat flux at the surface of metal foil heater under evaporating sessile droplets // Int. J. Aerospace Engineering. 2015. P. 391036 (1–5).
2. Medvedev D. A., Kupershtokh A. L. Electric control of dielectric droplets and films // Phys. Fluids. 2021. V. 33, N 12. P. 122103.
3. Куперштох А.Л., Медведев Д.А. Перфорация тонких жидких плёнок под действием неоднородного электрического поля // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63, № 6. С. 12–20.
4. Kupershtokh A.L., Medvedev D.A., Gribanov I.I. Thermal lattice Boltzmann method for multiphase flows // Phys. Rev. E. 2018. V. 98, N 2. Article 023308.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-29-01055).

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОКОАЛЕСЦЕНЦИИ ДВУХ КАПЕЛЬ ВОДЫ РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ РАДИУСОВ

Луцек В.В., Чирков В.А.

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб. 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

Одним из эффективных и распространённых способов разделения эмульсий обратного типа, когда дисперсионная среда является жидким диэлектриком, а дисперсная фаза электропроводящей жидкостью, является электродегидратация. В основе этой технологии лежит воздействие сильных электрических полей на микрокапли проводящей жидкости (например, воды), за счёт чего они начинают двигаться навстречу друг другу и, при определённых условиях, могут объединяться, образуя капли большего размера. Соответствующий процесс называется электрокоалесценцией. Однако по мере увеличения размеров капля может происходить и обратный процесс — декоалесценция, когда они вместо объединения разделяются на несколько более мелких частей или даже распыляются.

Для развития соответствующей технологии и улучшения характеристик электродегидраторов за последние годы широко распространилось применение численного моделирования. Однако в большинстве моделей используется избыточно идеализированная постановка, например, когда контактирующие капли имеют одинаковый размер [1]. Ввиду этого встаёт вопрос о том, как влияет различие радиусов капель на основные характеристики процесса, прежде всего, на порог перехода от коалесценции к декоалесценции и возможные исходы декоалесценции.

Настоящее исследование проведено на основе численного моделирования в двумерной осесимметричной постановке. Для описания двухфазной несмешивающейся жидкости использован произвольный лагранжево-эйлеров метод (также называемый методом подвижной границы). Преимуществом этого метода по сравнению с методами фазовой функции является то, что интерфейс в данном подходе является резким (не размытым), что позволяет задавать ступенчатое изменение свойств при переходе через границу раздела. Однако в этом методе стандартными средствами нельзя описывать изменение топологии, например, в момент касания двух капель, однако это проблема решается ручным перестроением геометрии и продолжением расчёта, что описано в работе [2]. Расчёт электростатических уравнений проводится в приближении идеально проводящих капель, для чего в модели на их поверхности задаются условия эквипотенциальности. Гидродинамика капель описывается на основе уравнений Навье — Стокса для несжимаемой изотермической жидкости.

Расчёты проведены для капель с радиусами от десятых долей до единиц миллиметров. Этот диапазон представляет наибольший интерес, поскольку при меньшем размере капля силы поверхностного натяжения столь велики, что при типовых для электродегидраторов значениях напряжённости электрического поля исходом взаимодействия всегда является коалесценция. А капли большего радиуса эффективно выводятся из эмульсии под действием силы тяжести. Для каждой пары радиусов проводился набор расчётов с последовательным повышением напряжения и фиксировались исходы. Основным охваченный диапазон напряжённостей электрического поля — от 1 до 4 кВ/см. Свойства контактирующих жидкостей выбраны соответствующими паре дистиллированная вода — оливковое масло. Коэффициент межфазного натяжения для этой пары — 16 мН/м.

Для нескольких радиусов одной капли проведено варьирование радиусов второй капли, и полученные результаты сопоставлены с тем, что получается для одинаковых капель. В результате выявлены значительные различия. Во-первых, в момент перед касанием капель одна капля заостряется, а вторая — притупляется, что в литературе иногда называют режимом взаимодействия «конус-лунка». Во-вторых, среди возможных исходов появляется широкая область (по напряжённости электрического поля), когда происходит частичная коалесценция, т.е. часть капли меньшего размера объединяется с большей каплей, а часть отрывается. В случае капель одинакового радиуса такой исход отсутствует. В-третьих, пороговая напряжённость электрического поля перехода от полной коалесценции к частичной определяется преимущественно размером большей капли, если сравнивать с аналогичной характеристикой для капель одинаковых радиусов.

### Список литературы

1. Chirkov V.A., Saifullin D.D., Utiugov G.O., and Samusenko A.V., Numerical Simulation of Non-coalescence Regime for Two Conducting Droplets at High Voltage Electrostatic Separation of Water-in-oil Emulsion // 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Mar. 2023. P. 1–5.
2. Utiugov G., Chirkov V., and Reznikova M., Application of the arbitrary Lagrangian-Eulerian method to simulate electrical coalescence and its experimental verification // Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.. 2021. V. 15, N 2. P. e02009.

*Работа поддержана РФФ  
(грант № 22-79-10078).*

## ПОВЕДЕНИЕ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА, РАСПОЛОЖЕННОГО НА ЭЛЕКТРОДЕ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

Ридель А.В., Бычков А.Л., Ломан В.А., Прокопенко Я.Г.

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

Маслонаполненное высоковольтное электрооборудование и, главным образом, силовые трансформаторы, являются одними из самых ответственных и дорогостоящих устройств в электроэнергетике. Очевидно, что их состояние существенно влияет на надёжность всей электрической сети. При этом трансформаторное масло является не только диэлектриком, но и теплопроводящей средой. Сложная конструкция трансформатора элементов и используемых материалов неизбежно приводит к появлению различных примесей [1-5]. С точки зрения влияния на электрическую прочность наиболее опасны твёрдые проводящие частицы, вода (особенно в виде капель) и пузырьки. В данной работе нами рассмотрено поведение пузырьков газа в объёме трансформаторного масла и процессы, которые сопровождают развивающиеся в нём частичные разряды.

Пузырьки могут привести к частичному разряду из-за низкой диэлектрической прочности газа и повышенного электрического поля в пузырьках. Образование и поведение пузырьков в однородных и резко неоднородных электрических полях также рассматривались ранее в многочисленных работах [6-8]. Поэтому появление и поведение пузырька в электрическом поле считается одной из важных причин пробоя жидких диэлектриков.

Однако, не смотря на большое количество исследований в данной области, до сих пор остаются нерешенные вопросы. Главным остается вопрос природы образования первого иницирующего электрона в газовом пузыре.

В работе экспериментально исследуются частичные разряды в пузырьках, расположенных на электроде в трансформаторном масле. Электроды расположены плоско-вертикально. Экспериментальная ячейка заполнена подготовленным трансформаторным маслом марки ГК. В качестве газа использовался гелий, который подавался на электрод использованием шприца с притёртым стеклянным поршнем. Высоковольтная комната, внутри которой располагается экспериментальная установка, оборудована в подвальном помещении ниже уровня земли. Стенки комнаты выполнены из листовой стали толщиной 1 мм.

Размер пузырьков  $\approx 2,5$  мм. Межэлектродный зазор  $\approx 6,8$  мм. Напряжение иницирования ЧР по закону Пашена для гелия при атмосферном давлении в разрядном промежутке размером, равным диаметру пузырька, составляет 6,5 кВ. После подачи газа на электрод экспериментальной ячейки подавалось напряжение и начиналась оптическая регистрация формы и размера пузырька.

На Рис. 1 приведены результаты оптической регистрации поведения пузырька гелия после развития частичного разряда в нём. На кадрах указано время в

мс, прошедшее с момента развития частичного разряда в пузырьке.



Рис. 1 - ЧР в пузырьке гелия

На представленных кадрах видно, что после развития частичного разряда в пузырьке (0 мс), происходит его удлинение на протяжении 2.67 мс и, после этого, область, соприкасающаяся с электродом - утоньшается, а область, направленная к противоположному электроду - увеличивается. На поверхности пузырька, обращенной к противоположному электроду наблюдается образование неоднородностей. Далее пузырек отрывается от электрода и начинает двигаться к противоположному. В некоторых случаях, при приближении к электроду, с его поверхности начинают развиваться нитевидные структуры.

В результате работы выявлено, что соприкосновение пузырька с высоковольтным металлическим электродом не влияет на частоту развития частичных разрядов в пузырьках. Кроме того, время ожидания частичного разряда в пузырьке, расположенном на электроде было заметно больше, чем в свободно всплывающем пузырьке.

### Список литературы

1. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы / Ю.И. Давыдов, Б.В. Дзюбенко, Г.А. Дрейцер и др.; Под ред. В.М. Иевлева. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
2. Суржиков С.Т. Перенос излучением в неоднородном слое // ТВТ. 1997. Т. 35, № 3. С. 1-2.
3. Kuznetsov V.V., Kozlov S.P. Modeling of methane steam reforming in a microchannel with a heat flow distributed in length // J. Eng. Therm. 2008. V. 17, N 1. P. 53-59.
4. Y. Zhang, J. Tang, C. Pan and X. Luo, "Comparison of PD and Breakdown Characteristics Induced by Metal Particles and Bubbles in Flowing Transformer Oil," IEEE Access, vol. 7, pp. 48098-48108, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2910081.
5. M. Tsuchie, M. Kozako, M. Hikita, and E. Sasaki, "Modeling of early stage partial discharge and overheating degradation of paper-oil insulation," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 21, pp. 1342-1349, 2014, doi: 10.1109/TDEI.2014.6832282.
6. X. Chen, Y. Qian, Y. Xu, G. Sheng, and X. Jiang, "Energy estimation of partial discharge pulse signals based on noise parameters," IEEE Access, vol. 4, pp. 10270-10279, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2647839.
7. J. Tang, Sh. Ma, X. Zhan, M. Zhang, Zh. Liu, X. Li and F. Zeng, "Investigation of partial discharge between moving charged metal particles and electrodes in insulating oil under flow state and AC condition," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, pp. 1099-1105, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2015.005448.
8. L. Luo, B. Han, J. Chen, G. Sheng, and X. Jiang, "Partial discharge detection and recognition in random matrix theory paradigm," IEEE Access, vol. 5, pp. 8205-8213, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2634622

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

Карпов Д.И.<sup>1,2</sup>, Ридель А.В.<sup>2</sup>, Савенко Р.А.<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,  
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

Ранее [1] экспериментально было обнаружено явление формирования стримера в жидком диэлектрике с границы "пузырёк-жидкость" после частичного разряда (ЧР) в пузырьке.

Разработана модель инициирования стримера с заряженной поверхности газового пузырька. Форма пузырька аппроксимировалась вытянутым эллипсоидом вращения. Электрическое поле на поверхности пузырька в предположении полной релаксации заряда в пузырьке в результате ЧР [1]

$$E_n = E_{\max} \tau \lambda / \sqrt{1 - (1 - \lambda^2) \tau^2},$$

где  $\lambda = a/b < 1$ ,  $a$  – малая полуось эллипса,  $b$  – большая полуось,  $\tau = z/b$  – координата вдоль поверхности эллипса, отсчитываемая от его вершины,  $E_{\max}$  – поле на вершине пузырька. Поле на вершине пузырька связано с полным зарядом ЧР («истинным» зарядом)

$$E_{\max} = 4Q_{\text{true}} / \varepsilon a^2.$$

Здесь  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость трансформаторного масла.

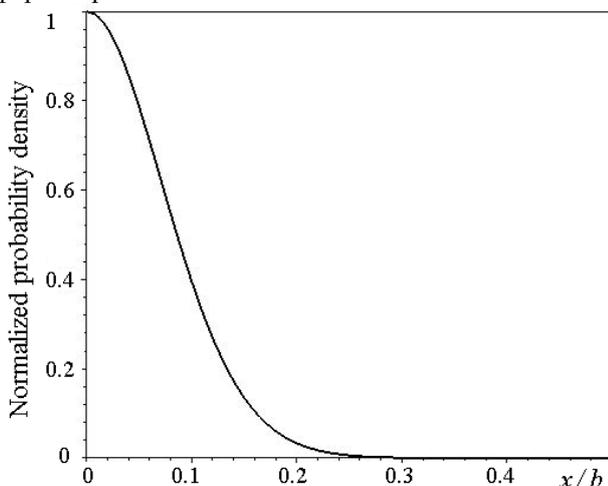


Рис. 1. Распределение плотности вероятности инициирования стримера на поверхности эллипсоидального пузырька в зависимости от расстояния до оси симметрии пузырька. Деформация 2:1.

В работе [2] предложено использовать плотность вероятности инициирования стримера в точке поверхности электрода в данный момент времени  $\mu(E)$  в локальном электрическом поле напряженности  $E$ . Введём аналогичную функцию для инициирования стримера с поверхности пузырька в жидкость при условии достаточности иницирующих электронов. Полная вероятность появления стримера в жидкости с момента начала ЧР (зарядки границы пузырька) до момента времени  $dt$  будет равна  $P_+ = 1 - \exp(-H(t))$ , где

$$H(t) = \int_0^t \int_S \mu(E) ds \quad (1)$$

безразмерное время инициирования. Здесь интегрирование по площади ведется по половине поверхности эллипсоидального пузырька, а по времени – с учётом изменения электрического поля со временем.

Используя полученную ранее [3] для трансформаторного масла зависимость

$$\mu(E) = 9 \cdot 10^4 E^{12} \text{ (см}^{-2} \text{ с}^{-1}\text{)}, \quad (2)$$

была рассчитана плотность вероятности зарождения стримера с поверхности пузырька в зависимости от положения точки на поверхности (рис. 1). Здесь  $E$  измеряется в МВ/см.

Можно считать, что зарождение стримера возможно вблизи вершины пузырька с пятна размером не более 300 мкм.

В случае эллипсоидального пузырька в (1) можно перейти к интегралу по напряженности поля:

$$M = \int_S \mu ds = 4\pi b^2 \lambda^4 E_{\max}^2 \int_0^{E_{\max}} \frac{\mu(E) dE}{E(\lambda^2 E_{\max}^2 + (1 - \lambda^2) E^2)},$$

который в случае (2) равен  $M = 66.83 \cdot E_{\max}^{12}$ .

На переменном напряжении формирование стримера возможно, как правило, когда значения приложенного напряжения близки к амплитудному значению, скажем  $U > 0.7 U_0$ .

При средней напряжённости поля в промежутке 75 кВ/см и деформации 5.6:1 напряжённость поля на вершине пузырька достигает  $E_{\max} \sim 1.2$  МВ/см и вероятность формирования стримера за один период напряжения с частотой 50 Гц становится более 0.74, что вполне согласуется с экспериментами.

Предложенная модель может быть использована для оценки вероятности пробоя изолирующих промежутков, заполненных трансформаторным маслом, при наличии газовых пузырьков в них.

#### Список литературы

1. Korobeynikov S.M., Ovsyannikov A.G., Ridel A.V., Karpov D.I., Lyutikova M.N., Kuznetsova Yu.A., Yassinskiy V.B Study of partial discharges in liquids // J.Electrostat. 2020. Vol. 103. Paper 103412, pp. 1–10.
2. Stochastic model of breakdown initiation in dielectric liquids / A. L. Kupershtokh, E. I. Palchikov, D. I. Karpov et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. Vol. 35, No. 23. P. 3106–3121.
3. Карпов Д.И. Моделирование инициирования и роста разрядных структур в жидких диэлектриках // Дисс...уч. степени канд.физ.-мат.наук. Томский политехнический университет. 2003. С.152.

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



# СЕКЦИЯ 10

## Теплообмен и гидродинамика в технологических процессах





Васильев А.Ю.

Федеральное автономное учреждение  
"Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова"  
улица Авиамоторная 2, Москва, 111116, Россия

Для эффективной работы камер сгорания авиационных ГТД качество распыла топлива имеет определяющее значение. В нормальных условиях применяемые жидкие топлива являются недостаточно летучими, и поэтому должны быть распылены в большое количество мелких капель. Эффективность распыла топлива зависит от способа подвода энергии через жидкость или газ, затрачиваемой непосредственно на процесс диспергирования струи или плёнки жидкости истекающей из сопла форсунки, формируя факел распыливания за фронтовым устройством КС. Помимо этого, на характеристики распыла влияют также и режимные параметры работы ГТД, которые изменяются в широком диапазоне условий эксплуатации. На основных режимах работы двигателя высокое качество распыливания может быть достигнуто применением метода пневматического распыла, который обеспечивает эффективность дробления и равномерное распределение капель топлива в аэрозоле. Однако в условиях запуска КС и на режиме малого газа данный метод может быть недостаточно эффективен ввиду отсутствия необходимого скоростного напора воздуха за последней ступенью компрессора, вследствие чего повышается средний заутеровский диаметр капель аэрозоля. Одним из способов повышения качества дробления жидкого топлива является метод барботирования, заключающийся в подводе воздуха высокого давления в топливные каналы форсунки, для его вспенивания и мгновенного распыла полученной смеси на выходе из сопла за счёт резкого увеличения объёма воздуха.

Для демонстрации потенциала данного метода распыла выполнено расчётное проектирование и исследование форсунки с мелкодисперсным распылом топлива. Объёмная модель спроектированного форсуночного модуля приведена на рисунке 1.

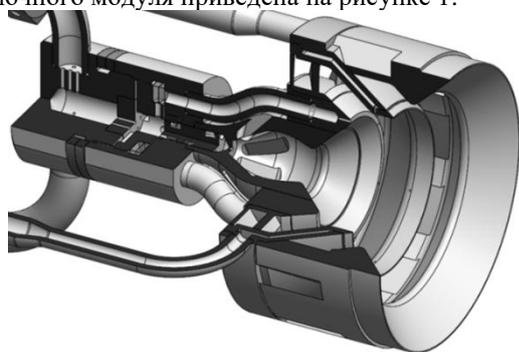
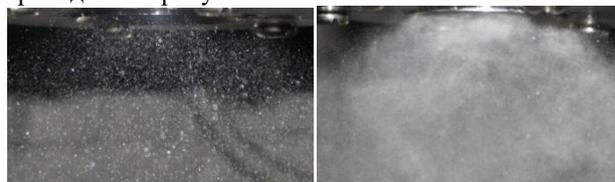


Рис. 1 3D модель форсунки

Форсуночный модуль состоит из центрального пилотного распылителя и коаксиально расположенного ему периферийного основного. Пилотный распылитель выполнен в виде центробежной и струйно-пневматической форсунки и имеет специальную камеру для барботирования топлива воздухом высокого

давления перед подачей в каналы распыливания. Процесс барботирования происходит путём встречного соударения пяти коллинеарно расположенных на корпусе барботера отверстий для топлива с 4-мя расположенными также, но во встречном направлении отверстиями для воздуха. Далее полученная эмульсия поступает в полости шнекового завихрителя первого канала пилотной форсунки и шесть струйных, расположенных по оси форсунки отверстий второго канала.

Определение основных дисперсных характеристик факела распыливания за пилотной форсункой выполнялось на расстоянии 30 мм от среза сопла в поперечном сечении. Визуализация факела распыла за форсункой с мелкодисперсным распылом топлива приведена на рисунке 2.



а) – без барботирования б) – с барботированием  
Рис. 2 – Фото аэрозоля при  $\Delta P_{\text{в}}=1,5$  кПа,  $G_m=1$  г/с.

При исследовании демонстратора-прототипа форсунки в режиме центробежно-пневматического распыливания с барботированием топлива в условиях запуска ( $\Delta P_{\text{в}}=1,5$  кПа) удалось добиться улучшения дисперсности аэрозоля на 31% без существенных изменений структуры течения за выходным соплом.

Выявлено, что при переходе на более высокие режимные параметры работы форсуночного модуля необходимо согласование расходов топлива и барботирующего воздуха для устойчивости факела распыла. В данных испытаниях установлено, что при соотношении расходов не более чем в 20% барботирующего воздуха от расхода топлива обеспечивается эффективное распыливание и устойчивость факела.

При пневматическом способе распыливания, применение барботирования приводит к перераспределению капель топлива по их размерам и диаметру факела распыла, не нарушая структуру течения, при этом дисперсность аэрозоля улучшается всего на 25%. Для дальнейшего улучшения дисперсности аэрозоля в два-три раза, необходимо увеличение давления топливоподачи при сохранении массового расхода топлива и давления барботирования в 200 кПа.

Исходя из вышеизложенного ясно, что применение метода барботирования топлива воздухом приводит, к улучшению характеристик аэрозоля, не нарушая основные параметры факела распыла.

#### Список литературы

1. Васильев А.Ю. Сравнение характеристик различных типов форсунок, работающих с использованием воздушного потока // Вестник СГАУ - 2007. - №2(13) - С. 54-61.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕСТНОГО ПИРОЛИЗА ОТХОДОВ

Горшков А.С.<sup>1,2</sup>, Ларионов К.Б.<sup>1,2,3</sup>, Губин В.Е.<sup>1,4</sup><sup>1</sup> Томский политехнический университет,  
пр. Ленина 30, Томск, 634050, Россия<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,  
ул. Весенняя 28, Кемерово, 650000, Россия<sup>3</sup> Университет МИСИС,  
Ленинский пр-кт. 4, стр. 1, Москва, 119049, Россия<sup>4</sup> Севастопольский государственный университет,  
ул. Университетская 33, Севастополь, 299053, Россия

Проблема обращения с отходами и побочными продуктами хозяйственной деятельности является распространенной по всему миру. Пиролиз является одним из возможных подходов по обращению с различными отходами, среди которых коммунальные отходы, биомасса, резинотехнические изделия и пластики [1].

Обеспечивающим высокую маневренность процесса методом является совместный пиролиз. В зависимости от требований к конечному продукту можно варьировать виды, формы и массовые отношения используемых компонентов. Кроме того, зачастую в процессе совместного пиролиза наблюдаются синергетические эффекты, которые выражаются в свойствах конечного продукта или возможности изменения технологических условий протекания процесса. В дополнении к этому реализация совместного пиролиза позволяет получить продукт, который может отличаться от того, что получается при смешении продуктов двух отдельно реализованных процессов [2].

Для оценки динамики и кинетики процесса разложения применяется термический анализ. В данной работе термогравиметрический анализ проводился в STA 449 C Jupiter (Netzsch, Germany) в присутствии аргона. Масса образца составляла около 10 мг, расход среды 20 мл/мин, диапазон температур 35-1000 °С, скорость нагрева 10 °С/мин. Исследовалось три образца: березовые опилки, резиновая крошка крупногабаритной техники и их смесь с массовым соотношением компонентов 1:1.

При сравнении прогнозируемых и полученных зависимостей скорости изменения массы (ДТГ) установлено, что при совместном пиролизе в диапазоне температур от 300 до 400 °С наблюдается незначительное повышение скорости разложения (около 7%).

Для оценки кажущейся энергии активации по однокоростному методу Коутса-Рэдферна была использована модель распределенной энергии активации, разбивающая процесс разложения на некоторое количество реакций первого порядка.

Березовые опилки, как и все древесные отходы, состоят из трёх основных компонентов: гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина (см. рис. 1). Верификация представленных зависимостей разложения осуществлялась с использованием материалов [3-4], посвящённых термическому разложению чистых веществ.

Практический интерес вызывает влияние технологических параметров совместного пиролиза на фи-

зико-химические свойства получаемого углеродного остатка. Для их определения было выполнено несколько серий экспериментов в слоевом лабораторном реакторе. Определялось влияние размера фракции (10-5 мм, 5-1 мм, 1-0,5 мм и 0,5-0,2 мм), взаимного расположения компонентов, расхода инертного агента на технические и текстурные характеристики получаемого углеродного остатка.

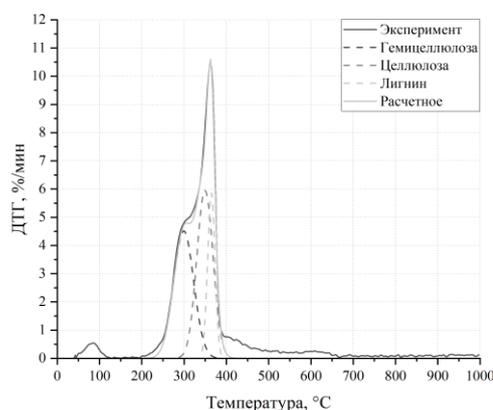


Рис. 1. Деконволюция данных для березовых опилок

## Список литературы

1. Zhang Z., Zhu Z., Shen B., Liu L. Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review // Energy. 2019. V. 171. P. 581-598.
2. Ahmed M.J., Hameed B.H. Insight into the co-pyrolysis of different blended feedstocks to biochar for the adsorption of organic and inorganic pollutants: A review // J. Clean. Prod. 2020. V. 265. P. 121762.
3. Poletto M., Pistor V., Snatana R.M.C., Zattera A.J. Materials produced from plant biomass: part II: evaluation of crystallinity and degradation kinetics of cellulose // Mater. Res. 2012. V. 15. N 3. P. 421-427.
4. Poletto M., Zattera A.J. Materials produced from plant biomass: part III: degradation kinetics and hydrogen bonding in lignin // Mater. Res. 2013. V. 16. N 5. P. 1065-1070.

Работа выполнена при финансовой поддержке  
Министерства науки и высшего образования  
Российской Федерации  
(проекты №075-03-2021-138/3  
(FZES-2021-0008) и  
№075-00268-20-02  
(ID: 0718-2020-0040)).

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ШАХТЕ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА**

Диденко Д.В., Никаноров О.Л., Рогожкин С.А.

АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород  
e-mail: didenko@okbm.nnov.ru

В настоящее время в АО «ОКБМ Африкантов» ведётся разработка реакторной установки с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором (РУ ВТГР). РУ ВТГР входит в состав атомной энерготехнологической станции, предназначенной для крупномасштабного производства водорода [1].

К современным проектам РУ, к которым относится РУ ВТГР, предъявляются повышенные требования по обеспечению безопасности. Одним из ключевых элементов РУ ВТГР, обеспечивающих необходимый уровень безопасности, является система охлаждения шахты реактора (СОШР), которая предназначена для отвода тепла и остаточных энерговыделений, аккумулированных в активной зоне и элементах конструкции реактора, с целью поддержания в допустимых пределах температуры топлива, корпуса реактора и бетона шахты реактора.

Продолжающийся рост производительности вычислительных и графических аппаратных средств, совершенствование математических алгоритмов и программного обеспечения в области вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD), обуславливает разработку новых подходов и методов при моделировании теплогидравлических процессов, происходящих в современных реакторных установках. Возможность использования этих методов для задачи расчётного обоснования реальных конструкций РУ ВТГР должна подтверждаться результатами сравнения с экспериментальными данными.

Таким образом, в настоящее время результаты экспериментальных и расчётных исследований СОШР японского высокотемпературного исследовательского реактора HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor), полученные в рамках координационной программы исследований МАГАТЭ [2, 3], представляют интерес в связи с проведением валидации современных CFD кодов для РУ ВТГР, а также разработкой технического проекта РУ ВТГР.

Одним из современных программных средств, используемых в АО «ОКБМ Африкантов» и имеющих большие возможности и широкий функционал для моделирования теплофизических и теплогидравлических процессов, является российский программный комплекс (ПК) вычислительной аэрогидродинамики FlowVision. ПК FlowVision предназначен для численного моделирования трёхмерных ламинарных и турбулентных, стационарных и нестационарных, изотермических и неізотермических течений жидкости и газа в технических устройствах различного назначения [4].

Целью численного моделирования тепломассопереноса в шахте работающего HTTR по ПК FlowVision является получение величины тепловой мощности, отводимой системой охлаждения и темпе-

ратурного профиля на поверхности корпуса реактора и боковых панелей охлаждения, и их сравнения с экспериментальными данными, полученными на реакторе.

Рассматриваются два стационарных режима работы СОШР – при работе реактора на мощности 9 МВт и при его работе на номинальной мощности 30 МВт.

Перенос тепла от нагретого в реакторе гелия к воде в теплообменных трубах осуществляется посредством сложного теплообмена в шахте реактора. В средах гелия, воздуха и воды за счёт совокупного действия таких элементарных физических явлений как конвекция (естественная и вынужденная), тепловое излучение, теплопроводность, происходит передача тепла между основными конструктивными элементами, которыми являются корпус реактора, тепловые экраны и теплообменные трубки панелей системы охлаждения.

Разработана методика численного моделирования тепломассопереноса в шахте HTTR по ПК FlowVision, а также разработаны трёхмерная геометрическая и расчётная модели, которые включали в себя основные элементы СОШР, шахту реактора и корпус реактора, с циркулирующим внутри него гелием.

В результате выполнения расчётных исследований получены распределения температуры по высоте корпуса реактора и тепловых экранов системы охлаждения шахты реактора, определена мощность, отводимая системой охлаждения.

Сопоставление результатов численного моделирования по ПК FlowVision, с экспериментальными данными для режимов работы реактора на мощности 9 и 30 МВт показало хорошее качественное и количественное совпадение основных контрольных параметров.

Полученные результаты численного моделирования планируется использовать при валидации ПК FlowVision, а также при разработке проекта АЭС с РУ ВТГР для производства водорода.

## Список литературы

1. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации, утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р
2. IAEA-TECDOC-1382 Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to initial testing of the HTTR and HTR-10, 2003.
3. Benchmark problems for rise-to-power test of high temperature engineering test reactor in IAEA coordinated research program. (Part II. Evaluation of performance of Vessel Cooling System) Akio Saikusa, Yukio Tachibana and Kazuhito Kunitomi. Japan Atomic Energy Research Institute, 2000.
4. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ FlowVision. Регистрационный номер 492 от 19.12.2019 г.

## ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ МАЛЫХ ГОРОДОВ И ПОСЕЛЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Елистратов С.Л.<sup>1,2</sup>, Ануфриенко А.В.<sup>2</sup>

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

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

e-mail: elistratov.sl@yandex.ru

Теплоснабжение с использованием малых угольных котельных и других теплоисточников на органическом топливе создает серьезные экологические проблемы [1,2]. Использование только электроотопительных устройств при высоких тарифах на электроэнергию по экономическим причинам становится невыгодным. Одним из эффективных вариантов решения проблемы может стать применение тепловых насосов парокомпрессионного (ПКТН) с электроприводом и абсорбционного (АТН) типов, использующих низкопотенциальное (до 40°C) тепло возобновляемых и сбросных источников (поверхностные и подземные воды, грунт, воздух, сточные воды, системы хозяйственно-питьевого и оборотного водоснабжения и др.).

Экологический эффект от применения теплонасосных установок (ТНУ) на базе ПКТН и АТН соответственно определяется через относительную экономию топлива:

$$\begin{aligned} \Delta G &= G_K \left(1 - \frac{\eta_K}{\varphi \cdot \eta_{ПР}}\right) = \\ &= G_K \left\{1 - [(0,9 - 0,4) / (3,0 - 5,0) \cdot 0,33]\right\} = \\ &= (0,1 - 0,75)G_K \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta G &= G_K \left(1 - \frac{\eta_K}{\mu \cdot \eta_{ПР}}\right) = \\ &= G_K \left\{1 - [(0,9 - 0,4) / (1,7 - 2,2) \cdot 0,85]\right\} = \\ &= (0,37 - 0,79)G_K \end{aligned}$$

Здесь:  $G_K$  - расход топлива в котельной в т.у.т.;  $\eta_K$  - среднегодовой КПД котла на органическом топливе,  $\varphi$  - среднегодовой коэффициент преобразования ПКТН,  $\mu$  - среднегодовой коэффициент термотрансформации АТН,  $\eta_{ПР}$  - показатель полезного использования энергии исходного топлива соответственно при затратах на выработку электроэнергии с эффективностью 0,33 кг у. т./кВт·ч и доставку электроэнергии с 10% потерями в ЛЭП от КЭС или ТЭЦ до привода ПКТН или использования теплоты высокого потенциала ( $\geq 100^\circ\text{C}$ ) в генераторах АТН.

На рис.1 представлены расчётные данные по топливной эффективности отдельно для котельных на органическом топливе с  $\eta_K = 0,35 \dots 1,0$ ; электрокотлов с КПД=0,98 и ПКТН с  $\varphi = 1,1 \dots 10,0$ , а также комбинированных теплоисточников «ПКТН + топливная котельная» (сплошные линии) и «ПКТН + электрокотел» (пунктирные линии) в зависимости от доли участия ПКТН в отоплении  $\bar{Q}_{ПН}$ .

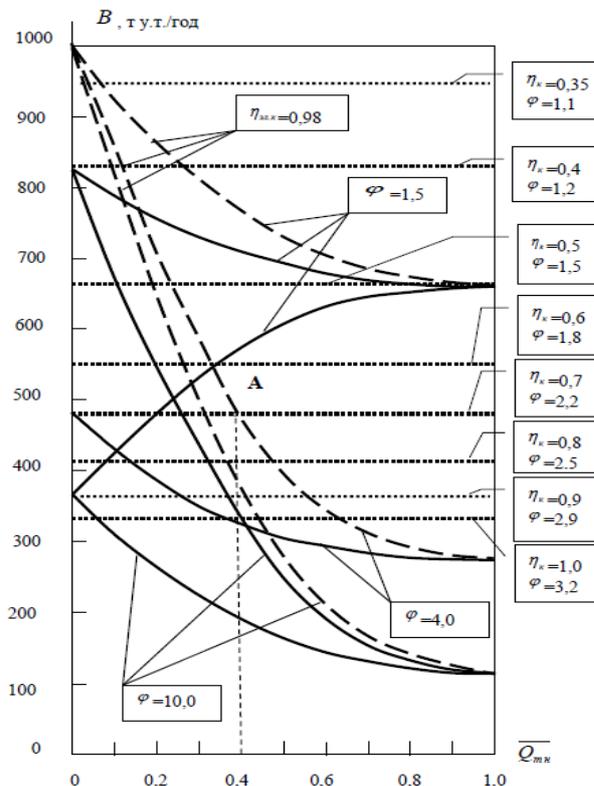


Рис. 1. Сравнение годовых затрат условного топлива для теплоисточников системы отопления 1,0 МВт.

Можно видеть (см. т. А), что одинаковые показатели для ПКТН и топливной котельной будут при  $\varphi = 2,2$  и  $\eta_K = 0,7$ . Показатели энергетической эффективности для комбинированного теплоисточника «ПКТН + электрокотел» могут быть намного лучше, чем у «идеальной» топливной котельной с  $\eta_K = 100\%$  в широком рабочем диапазоне значений  $\varphi$ .

Таким образом, для создания экологически чистых систем теплоснабжения отдельных населенных пунктов могут быть предложены комбинированные теплоисточники на основе электроотопления в комбинации с тепловыми насосами.

### Список литературы

1. Экологические характеристики теплоисточников малой мощности /Филиппов С.П., Павлов П.П., Кейко А.В. и др./Иркутск: ИСЭМ СО РАН, препр. № 5, 1999. 48 с.
2. Накоряков В.Е., Елистратов С.Л. Оценка экологической эффективности теплоисточников малой мощности // Промышленная энергетика. 2009. №2. С.44-52.

## СИСТЕМА ТРИГЕНЕРАЦИИ НА БАЗЕ ЦИКЛА СТИРЛИНГА И АБСОРБЦИОННОГО ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРА

Елистратов С.Л.<sup>1,2</sup>, Хорева В.А.<sup>2</sup>, Чирцов Д.Ю.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия  
e-mail: elistratov.sl@yandex.ru

Совместная выработка электричества, тепла и холода является актуальным трендом современной энергетики [1]. При этом особое внимание уделяется системам тригенерации, способным работать как на органических видах топлива, так и возобновляемых источниках энергии. Этим объясняется повышенный интерес к машинам, в которых реализуются рабочие циклы с внешним подводом тепла при выработке электроэнергии и абсорбционным бромистолитиевым термотрансформаторам (АТТ), в которых для выработки теплоты для нужд теплоснабжения ( $\leq 100$  °С) и холода положительных (5-12 °С) и отрицательных температур ( $\geq -5$  °С) используется теплая энергия среднего температурного потенциала ( $\leq 200$  °С).

Схемное решение по синтезу двигателя Стирлинга с внешним подводом тепла и АТТ в систему тригенерации основано на создании общего циркуляционного контура однофазного теплоносителя, интегрированного в генератор АТТ и внешнюю камеру сгорания двигателя Стирлинга. Общий циркуляционный контур (см. рис. 1, поз. 2) обеспечивает последовательное распределение тепловой энергии с начальной температурой 120 °С, полученной во внешней камере сгорания (рис. 1, поз. 1) от дымовых газов со средней температурой 950 °С, между генератором, системой отопления и горячего водоснабжения, абсорбером, конденсатором АТТ и радиатором охлаждения двигателя Стирлинга (рис. 1, поз.3).

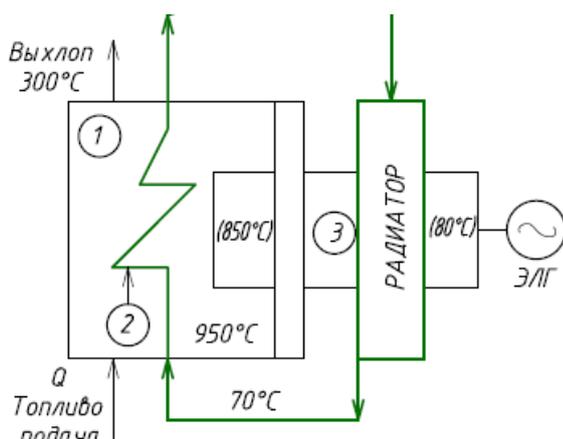


Рис.1 Основной элемент технологической схемы.

Все тепловые расчёты были выполнены для 1 кг у. т. (природный газ) на входе в камеру сгорания при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,1$ .

В таблице 1 представлены данные, характеризующие эффективность системы тригенерации.

Таблица 1. Оценка эксергии потоков энергии в системе тригенерации «двигатель Стирлинга + АТТ», МДж / кг у.т.

На входе	Потери	Продукты тригенерации				$\eta_i$	$\eta_e$
		Эл./энергия	Отоп	ГВС	Холод		
29,3	2,11	12,4	0,71	0,19	0,07	0,72	0,43

Здесь  $\eta_i$  и  $\eta_e$  - соответственно коэффициенты энергетической и эксергетической эффективности системы тригенерации.

Использование энергии солнечного излучения в качестве исходного экологически чистого «топлива» для работы тригенерационной системы возможно при условии его концентрирования для обеспечения эффективной выработки электроэнергии на основе двигателя Стирлинга.

Для г. Новосибирска среднее значение поступления солнечной энергии составляет для следящего за солнцем и горизонтального неподвижного коллекторов соответственно 2680 и 1285 кВт·ч./м<sup>2</sup>/год [2]. Оценочные расчёты показали, что для обеспечения работы системы тригенерации электрической мощностью 1,0 кВт при выработке 0,74 кВт, 0,2 кВт и 0,08 кВт соответственно для нужд отопления, ГВС и кондиционирования потребуется затратить  $8,12 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с природного газа или использовать солнечный коллектор с тепловоспринимающей поверхностью не менее 8,5 м<sup>2</sup> с концентраторами энергии [3] для обеспечения эффективной работы двигателя Стирлинга.

### Список литературы

1. Каталог с официального дилерского сайта инженерной группы Линюка – Смирнова «ИГЛС»/ АБХМ BROAD с комбинированным источником тепла/ 196233, г. Санкт-Петербург/ 2023 г.
2. Khoreva V., Elistratov S., Vorogushina N., Sadkin I. Mathematical simulation of the flux of the solar radiation coming to the collector. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2022 : International symposium on sustainable energy and power engineering (SUSE-2021), Kazan, 18-20 Febr. - P. 207-215.
3. Солнечные электростанции: концентраторы солнечного излучения: учеб. пособие для вузов / Д. С. Стребков, Э. В. Тверьянович ; под ред. Д. С. Стребкова. — 2-е изд., испр. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 265 с. — (Серия : Авторский учебник)

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЦЕННЫХ ПРОДУКТОВ ИЗ НЕФТЕШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ ПАРОВОГО ПИРОЛИЗА

Калтаев А.Ж.<sup>1</sup>, Ларионов К.Б.<sup>1,2,3</sup>, Губин В.Е.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет  
Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30.

<sup>2</sup>Университет науки и технологий МИСИС,  
Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1

<sup>3</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева,  
650000, Кемеровская область – Кузбасс, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>4</sup>Севастопольский государственный университет,  
Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.

Нефть является одним из самых распространенных энергетических ресурсов в мире, добыча, транспортировка, хранение и переработка которой сопряжена с образованием значительного количества отходов, одним из которых является нефтяной шлам (НШ) [1]. Данный тип отхода имеет высокий класс опасности, состоящий из воды, нефти, минеральных примесей и различных отложений (песок, глина, ил и др.) [2]. При этом соотношение данных компонент варьируется в очень широких пределах в зависимости от вида нефти, способа её хранения и переработки. По различным оценкам [3] ежегодный объём образования НШ составляет около 60 млн.т. В отсутствии ресурсоэффективных и экологически безопасных подходов устойчивого управления НШ, их продолжительное накопление может привести к глобальным экологическим проблемам в виде масштабного загрязнения почвы, атмосферы и грунтовых вод, в последствии поставив под угрозу здоровье человека.

Одним из эффективных и перспективных методов переработки НШ является их термическая конверсия (пиролиз, газификация, сжигание) [4]. Рассматривая метод сжигания НШ, их процесс горения может быть неустойчивым ввиду нестабильности компонентного состава данного материала. Впоследствии это может привести к нарушению режима работы горелочных устройств котельных агрегатов, что снизит их эффективность и надежность. Также процесс горения НШ сопровождается выделением токсичных и вредных газов. При этом методы пиролиза и газификации в сравнение с сжиганием позволяют обеспечить более широкую вариативность получаемых энергетически ценных продуктов при температурах 500-600 °С. Образующиеся жидкие углеводороды (основной продукт пиролиза НШ) могут быть использованы в качестве энергетического топлива или сырья для нефтехимических производств. В свою очередь неконденсируемый газ и углеродный остаток могут быть возвращены в технологический цикл термической переработки НШ в качестве вторичного энергетического потока, т.к. преимущественно процесс пиролиза протекает в аллотермическом режиме.

При этом процесс термического преобразования НШ в среде перегретого пара (при температурах 500-700 °С) может иметь ряд экологических и технологических преимуществ, заключающихся в нейтрализации вредных образующихся соединений (диоксины, фураны, бензапирены и др.) в парогазовой смеси и

улучшения качественных показателей сконденсированных жидких углеводородов (снижение содержания сернистых соединений, золы, изменения молекулярной массы легких углеводородов). Также использование перегретого пара в качестве агента преобразования НШ способствует повышению содержания  $H_2$  в образующемся синтез-газе:  $C+H_2O \rightarrow CO+H_2$ ,  $CH_4+H_2O \rightarrow CO+3H_2$  и  $CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2$  [5].

Жидкие углеводороды, полученные методом парового пиролиза НШ имеют сопоставимые энергетические характеристики (теплота сгорания – 38 МДж/кг, содержание воды – 8 масс. %, содержание серы – 1.9 масс. %, плотность – 920 кг/м<sup>3</sup>) с традиционным мазутом и могут быть использованы в качестве печного топлива на энергетических объектах [6].

В настоящей работе представлены результаты комплексных исследований физико-химических характеристик энергетических продуктов, полученных на пилотной установке парового пиролиза НШ. Была выполнена экспериментальная апробация основного энергетического продукта - жидких углеводородов: распыл, воспламенение и горение.

### Список литературы

1. Li J., Lin F., Xiang L., Zheng F., Che L., Tian W., Guo X., Yan B., Song Y., Chen G. Hazardous elements flow during pyrolysis of oily sludge // J. Hazard. Mater. 2021. Vol. 409. P. 124986.
2. Mazlova E.A., Meshcheryakov S. V. Ecological characteristics of oil sludges // Chem. Technol. Fuels Oils. 1999. Vol. 35, № 1. P. 49–53.
3. Da Silva L.J., Alves F.C., De França F.P. A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries // Waste Manag. Res. 2012. Vol. 30, № 10. P. 1016–1030.
4. Zhou L., Jiang X., Liu J. Characteristics of oily sludge combustion in circulating fluidized beds // J. Hazard. Mater. 2009. Vol. 170, № 1. P. 175–179.
5. Mei Z., Chen D., Zhang J., Yin L., Huang Z., Xin Q. Sewage sludge pyrolysis coupled with self-supplied steam reforming for high quality syngas production and the influence of initial moisture content // Waste Manag. Elsevier, 2020. Vol. 106. P. 77–87.
6. Gao N., Kamran K., Quan C., Williams P.T. Thermochemical conversion of sewage sludge: A critical review // Prog. Energy Combust. Sci. 2020. Vol. 79. P. 100843.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты №075-03-2021-138/3 (FZES-2021-0008) и №075-00268-20-02 (ID: 0718-2020-0040)).*

## ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В ЛОКАЛЬНОЙ ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГАЗОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Борисов Б.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А., Салагаев С.О., Салихов Ф.Ю.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

e-mail: elf@tpu.ru

Газовые инфракрасные излучатели (ГИИ) – один из вариантов решения проблемы экономически эффективного теплоснабжения предприятий с большими производственными помещениями и малыми рабочими зонами [1]. Для создания регламентных условий для рабочего в таких зонах необходимо обеспечить не только регламентную температуру, но и скорость движения воздуха (направление перемещения) вследствие термогравитационной конвекции в помещении. Применение современных приборов измерения скорости движения газов (анемометры) вследствие их конструктивных особенностей ограничено нижним пределом диапазона измерений (около 0,2 м/с). Такие приборы обладают также рядом недостатков: измеряют скорость воздуха только в определённых точках исследуемого пространства, невозможно определять направление движения среды, а также вносят возмущения в поток за счёт ввода измерительного щупа. Оптические методы определения основных параметров перемещения воздушных масс таких недостатков лишены.

Цель работы – анализ структуры течения воздуха, возникающего в результате нагрева поверхностей, расположенных в локальной рабочей зоне, на формирование полей скоростей воздуха в условиях работы газового инфракрасного излучателя с использованием оптического метода SIV (Smoke Image Velocimetry). Метод основан на измерении перемещений турбулентных структур, визуализируемых в световом ноже при помощи трассеров.

Схема экспериментального стенда приведена на рисунке 1.

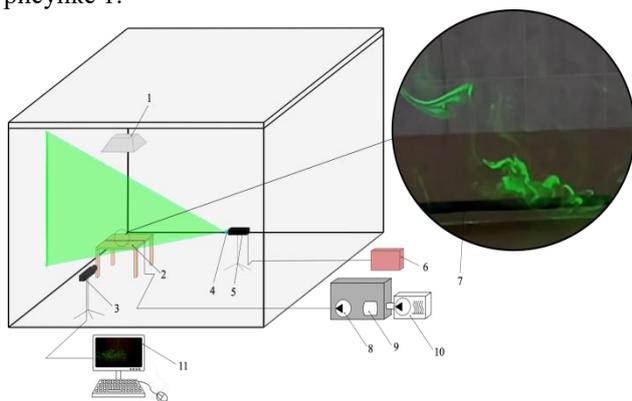


Рис. 1. – Схема экспериментального стенда: 1 – ГИИ, 2 – рабочая поверхность, 3 – высокоскоростная камера, 4 – оптическая система создания плоскопараллельного луча, 5 – лазерный излучатель, 6 – блок питания и управления лазерным излучателем, 7 – распределитель трассеров, 8 – нагреватель, 9 – буферная емкость, 10 – генератор трассеров, 11 – персональный компьютер.

Использовался генератор трассеров ультразвуковой с жидкостью  $C_3H_8O_2$ . Динамика визуализируемого течения регистрировалась цифровой скоростной

видеокамерой EVERCAM с частотой 1000 кадров/сек. Для определения динамики векторного поля скорости по результатам дымовой визуализации использовалась программа PivLab разработанной на базе Mathworks MATLAB [2].

На рисунке 1 представлены поле скоростей и профиль скорости в сечении  $x = 0,275$  м (центр симметрии ГИИ и нагреваемой панели) воздуха, формирующееся в локальной зоне над поверхностью горизонтальной панели (модели оборудования).

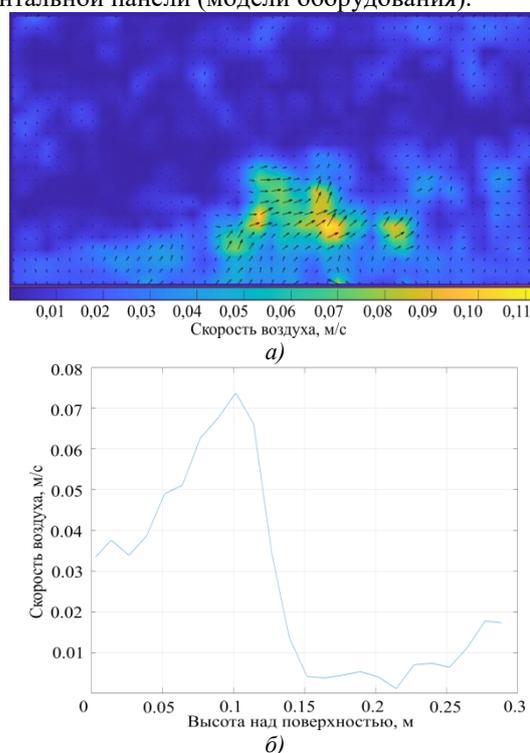


Рис. 2. Поле скоростей (а) и профиль скорости по высоте ( $0,775 < y < 1,100$  м) в центральном сечении ( $x=0,275$  м) (б).

Над панелью формируется зона нагретого воздуха, который поднимается вверх со смещением в сторону, к центру помещения. Структура течения неоднородна, основной поток формируется над центром панели (центр симметрии ГИИ) с максимальной скоростью 0,11 м/с.

### Список литературы

1. Maksimov V.I., Nagornova T.A., Kurilenko N.I., Voloshko I.V. Advantage analysis of systems for ensuring local working zones thermal conditions based on gas infrared emitters in comparison with traditional convective heating systems // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. 2021, V. 332 (9), P. 128–141.
2. Thielicke W., Sonntag R. Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab // Journal of Open Research Software 2021, V. 9, Is. 1, Article 12.

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

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Лысакова Е.И., Жигарев В.А., Скоробогатова А.Д.

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

Эффективность процесса бурения нефтяных и газовых скважин во многом определяется качеством бурового раствора. В практике бурения применяют буровой раствор на водной и углеводородной (минеральные масла, нефть, дизельное топливо) основах. Растворы на углеводородной основе обладают рядом важных преимуществ: высокой стабильностью во времени; инертны в отношении глин и солей; обладают хорошими антикоррозионными и триботехническими свойствами; обладают высокой термостойкостью; их фильтрат не оказывает вредного влияния на продуктивные нефтяные горизонты [1]. Также при бурении растворами на углеводородной основе не наблюдается такой быстрый износ бурового инструмента, как в случае с буровыми растворами на водной основе. Важным свойством буровых растворов на углеводородной основе является их низкая растекаяющая способность при бурении мерзлых пород за счёт низкого коэффициента теплопроводности. Однако, несмотря на свои неоспоримые преимущества, растворы на углеводородной основе имеют ряд серьезных недостатков, основным из которых является их высокая токсичность для окружающей среды. По этой причине их применение на законодательном уровне пытаются ограничить в ряде развитых стран [2]. При бурении нефтяных скважин используется система сложных жидкостей и химических добавок. Потери этих жидкостей в скважине во время бурения или их утилизация на буровой площадке могут привести к переносу загрязняющих веществ в грунтовые воды. Углеводороды, используемые в буровых растворах на нефтяной основе, которые не могут быть легко деградированы в природе, являются наиболее серьезным загрязняющим материалом, образующимся в результате удаления бурового раствора и шлама. Объём отходов бурения для большинства современных нефтяных скважин оценивается в среднем почти 0,5 м<sup>3</sup> на один метр пробуренной скважины. Особенную опасность буровые растворы на основе нефтяных углеводородов представляют для водной среды при бурении на континентальном шельфе или бурении глубоководных скважин.

На основании вышеизложенных проблем предлагается разработка новых буровых растворов на основе экологически чистых растительных масел и системный анализ их физико-химических свойств, на основании которых будут сформулированы некоторые рекомендации по использованию таких растворов при строительстве скважин в сложных горногеологических условиях [3]. На данный момент уже есть первые экспериментальные результаты исследования свойств бурового раствора на основе технического растительного рапсового масла и их сравнение с растворами на углеводородной основе [4,5]. Показано, что буровой раствор на основе технического рапсо-

вого масла по своим характеристикам не уступает аналогичному раствору на основе синтетического масла, что открывает широкую перспективу использования подобных систем в качестве экологически чистых аналогов существующих буровых растворов на углеводородной основе.

Проводимые научно-исследовательские работы позволят провести научное обоснование эффективности и экологичности применения растительных масел в качестве биodeградируемого компонента буровых растворов. Разработанный пакет рецептур буровых растворов и способов их применения позволит обеспечить достижение показателей развития нефтегазовой отрасли края, значительно снизить вредное воздействие на экосистемы сибирской природы и Арктики за счёт значительного снижения объёма экологически опасных (токсичных) отходов бурения. Кроме этого, предложенные технологии позволят сформировать новый рынок биodeградируемых, экологически чистых, возобновляемых компонентов российского производства, применяемых в нефтегазодобыче. Данный проект актуален не только с точки зрения практического применения, но и имеет значительный интерес для фундаментальной науки. Задача создания бурового раствора, обладающего современными функциональными характеристиками, требует глубоких междисциплинарных исследований в области физической и коллоидной химии, гидродинамики многофазных потоков, геологии, математического моделирования механики сплошных сред. В результате этих исследований будут получены новые фундаментальные знания о свойствах сложных коллоидных систем, их реологии, особенностях их течений и фильтрации.

*«Исследование выполнено за счет гранта Российской государственной научной библиотеки, Красноярского краевого фонда науки № 22-29-20087, <https://rscf.ru/project/22-29-20087/>»*

### Список литературы

1. Davies J.M, Addy J.M, Blackman R.A, Blanchard J.R, Ferbrache J.Eet al. Environmental effects of the use of oil-based drilling muds in the North Sea // Mar Pollut Bull. 1984. V. 15. P. 363–370
2. Jha P.K., Mahto V., Saxena V.K. Emulsion based drilling fluids: an overview // Int.J. Chem. Res. 2014. V. 6. P. 2306–2315.
3. Fadairo A., Falode O., Ako C., Adeyemi A. Novel formulation of environmentally friendly oil based drilling mud: INTECH Chapter 3. 2012. P. 1–32
4. Лысакова Е.И., Скоробогатова А.Д., Матвеев А.В., минаков А.В. Исследование и разработка эмульсионных буровых растворов на основе технических растительных масел // ЭКП. 2023. Т. 27, № 7. С. 46-53
5. Лысакова, Е.И.; Жигарев, В.А.; Скоробогатова, А.Д.; Минаков, А.В. Исследование коллоидной устойчивости и реологических свойств инвертной эмульсии с растительным маслом в качестве основы для бурового раствора // Журнал СФУ. Химия. 2022. Т. 15, № 4. С. 529-538

## ВЛИЯНИЕ ДОЛИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ТОРФА НА ВЫХОД ТРЁХ ПОЛЕЗНЫХ ПРОДУКТОВ: ЖИДКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ, СИНТЕЗ-ГАЗ, УГЛЕРОД

Мисюкова А.Д.<sup>1,2</sup>, Янковский С.А.<sup>1,2</sup>, Берикболов А.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Переход от традиционного ископаемого топлива к возобновляемым энергоносителям можно назвать трендом 21 века. Угольные электростанции являются крупнейшими в мире источниками выбросов парниковых газов. Снижение углеродного следа остро встаёт перед сообществом учёных-энергетиков. Одним из наиболее распространённых возобновляемых источников энергии является биомасса, благодаря своей доступности и дешевизне, в частности, древесина и торф. Россия обладает крупнейшими в мире запасами торфа. Общие запасы торфа, по состоянию на 2022 год, составляли около 175 млрд тонн, это больше 47% мировых запасов[1]. Ежегодные отходы древесной биомассы составляют 2,1 млрд тонн. Однако торф и древесная биомасса в чистом виде не могут являться топливом для энергетических установок, и потому важно находить способы получения полезных энергетических продуктов в процессе переработки этих видов топлива.

Преобразование торфа и биомассы в функциональные углеродсодержащие материалы может стать эффективной альтернативой традиционным энергетическим топливам. Одним из способов переработки смесевых торфяно-древесных топлив является метод ускоренного пиролиза. Он позволяет за короткое время получать из смесового низкоэнергетического топлива несколько полезных продуктов: синтез-газ с высоким содержанием метана, углеродный остаток и жидкие углеводороды.

Экспериментальные исследования проводились с материалами: торф Суховинского месторождения Томской области, второй компонентой являлись отходы лесопиления (ЛПК с. Дзержинское, Томская область). Смесей торфа и биомассы формировались в широком диапазоне концентраций от 10 % до 90 %. Термическая конверсия выполнялась при температуре 600 °С, в период проведения эксперимента проводилась непрерывная продувка инертным газом и проводился газовый анализ. В результате ускоренного пиролиза было получено три полезных энергетических продукта: синтез-газ, жидкие углеводороды и углерод.

При проведении газового анализа было определено, что синтез-газ, полученный из смеси торфа и отходов лесопиления имеет высокое содержание метана до 25 %. Количество метана в газе напрямую зависело от доли древесной биомассы в смеси, что наглядно представлено на рисунке 1.

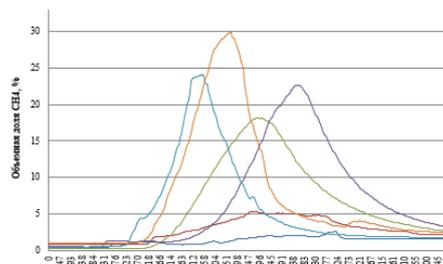


Рис.1 Влияние концентрации биомассы в смеси с торфом на формирование объёмной доли метана

Количество полученного в результате пиролиза углеродного остатка также зависело от количества в смеси отходов лесопиления.

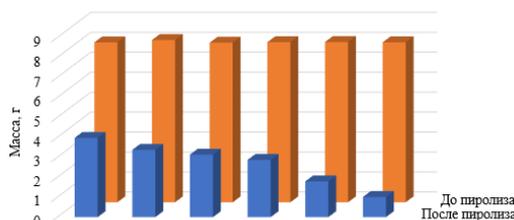


Рис. 2 Изменение массы смеси при пиролизе. 1 – Т\_100 % / Д\_0 %; 2 – Т\_90 % / Д\_10 %; 3 – Т\_75 % / Д\_25 %; 4 – Т\_50 % / Д\_50 %; 5 – Т\_25 % / Д\_75 %; 6 – Т\_0 % / Д\_100 %

Из анализа рисунка 2 видно, что при увеличении доли древесных опилок в смеси масса углеродного остатка уменьшается. Это связано с тем, что древесные опилки имеют высокое содержание летучих газов, которые выделяются в процессе пиролиза.

Третьим продуктом, полученным в процессе пиролиза, являются жидкие углеводороды, полученные в процессе охлаждения и конденсации газов. Типичные изображения таких продуктов представлены на рисунке 3.



Рис. 3 Жидкие углеводороды, полученные при разложении топливных смесей

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проектов № FZES-2021-0008, Приоритет-2030-НИИП/ЭБ-040-375-2023.

### Список литературы

1. «Министерство энергетики РФ» <https://minenergo.gov.ru/node/1230> (accessed May 14, 2023).

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ БРОМИСТОЛИТИЕВЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ (АБТН) В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ С УТИЛИЗАЦИЕЙ ТЕПЛА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Мухин Д.Г.<sup>1,2</sup>, Елистратов С.Л.<sup>1,2</sup>, Степанов К.И.<sup>1</sup>

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

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

Абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины (АБХМ) и тепловые насосы (АБТН) широко используются в мире как теплоиспользующее и энергосберегающее оборудование. АБХМ применяются для охлаждения жидкостей с положительными температурами. Тепловые насосы (АБТН) используются для подогрева воды в системах теплоснабжения и утилизации техногенного сбросного тепла либо тепла природных геотермальных источников. АБТН подразделяются на понижающий и повышающий типы.

Понижающий АБТН подогревает воду в системах отопления и горячего водоснабжения. При этом АБТН утилизирует сбросное техногенное тепло, например, воды оборотных систем ТЭЦ (охлаждающая вода после конденсаторов турбин) и предприятий (сточные воды). АБТН понижающего типа может утилизировать тепло низкопотенциальных геотермальных источников с температурой до 45 °С. В качестве источника энергии, в АБТН понижающего типа используется высокопотенциальное тепло - природный газ либо пар с давлением до 0,9 МПа.

Повышающие АБТН могут быть использованы для утилизации отработанного техногенного тепла с потенциалом от 70 до 95 °С с частичным возвратом тепла повышенного потенциала (от 90 до 120 °С) в производственный цикл (частичный рециклинг тепла). В качестве источника энергии в АБТН повышающего типа используется только сбросное тепло, продуктом является тепло повышенного потенциала.

В России, особенно в Кавказских республиках и в предгорье (Краснодарском край, р. Адыгея и т.д.) имеется большое количество геотермальных источников с температурным потенциалом до 95 °С. Тепло этих источников можно утилизировать в АБТН с трансформацией на более высокий температурный уровень и использовать его для отопления и в производственных процессах.

В России имеется опыт эксплуатации АБТН понижающего типа с утилизацией тепла геотермального источника [1]. В 2005 г. в Краснодарском крае в тепличном комплексе ОАО «Юг-Агро» были установлены два тепловых насоса АБТН-600Т с газовым обогревом. В качестве источника утилизируемой теплоты использовалась геотермальная вода из скважины с температурой до 90 °С. Сначала геотермальная вода поступала в подогреватели сетевой воды отопления, где охлаждалась до температуры 40-45 °С. После этого геотермальная вода подавалась в испарители АБТН, где её теплота утилизировалась с охлаждением до 20-25 °С. АБТН-600Т использовались для нагрева сетевой воды отопления с 40-45 °С до 75 °С. В данной конфигурации тепловые насосы эксплуатировались шесть отопительных сезонов, по-

сле чего были законсервированы по причине появления другого источника сбросного тепла (газопоршневые установки).

Таким образом, при наличии геотермального источника АБТН понижающего типа может вырабатывать тепло для автономной системы отопления с экономией топлива, эквивалентного утилизируемой теплоте (экономия до 41% газа по сравнению с водогрейным газовым котлом).

Для АБТН повышающего типа при наличии геотермально источника с температурой от 85 до 95 °С, может быть реализован цикл получения производственного тепла с температурным потенциалом от 110 до 120 °С. Особенно это актуально для спиртового производства в республиках Кавказа.

В настоящее время, в мире встречается использование АБТН повышающего типа в производстве спирта. В качестве источника энергии для АБТН используются пары спирта после ректификационной колонны [2], которые конденсируются в испарителе и генераторе АБТН. Однако АБТН, при утилизации единицы тепла конденсата, возвращает в производственный цикл только половину единицы тепла в виде горячей воды либо водяного пара с температурой до 120 °С. Вторая половина компенсируется из парового котла.

Таким образом, при наличии геотермального источника, расположенного вблизи спиртзавода, можно установить АБТН повышающего типа, который будет частично компенсировать производство греющего источника для ректификационных колонн, существенно сократив расход топлива для котлов.

Оценочные расчёты показывают, что среднее значение теплового коэффициента АБТН повышающего типа (отношение производимого тепла высокого потенциала к количеству утилизируемого тепла), в условиях производства пара с температурой 120 °С, составляет около 0,5.

### Список литературы

1. Горшков В.Г., Паздников А.Г., Мухин Д.Г., Севастьянов Р.В. Промышленный опыт и перспективы использования отечественных абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин и тепловых насосов нового поколения// Холодильная техника – 2007. – № 8. – С. 23-31.
2. Falk Cudok, Niccolo Giannetti et al., Absorption heat transformer - state-of-the-art of industrial applications// Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. V. 141/ 110757 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110757>

*Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800229-1)*

Наумкин В.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
пр. Лаврентьева 1, Новосибирск, 630090, Россия  
Новосибирский государственный технический университет,  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

e-mail: vsnaumkin@itp.nsc.ru

В связи с ростом мощности источников синхротронного излучения появляется необходимость в проектировании эффективных способов охлаждения оптических устройств. Неравномерный нагрев оптических устройств может привести к деформированию отражающей поверхности, что будет неблагоприятно сказываться на работе станции. В литературе рассматривается большое количество различных геометрий зеркал, позволяющих снижать величину возникающих термодформаций.

В работе рассматривается керамическое зеркало с вырезом по бокам, так называемая «smart-cut» геометрия. В работе численно промоделировано влияние глубины выреза на величину деформаций зеркальной плоскости. Размеры зеркала представлены на рис. 1. Все размеры указаны в миллиметрах. Рассматривалась плоскосимметричная задача. Ниже представлен способ закрепления керамического зеркала.

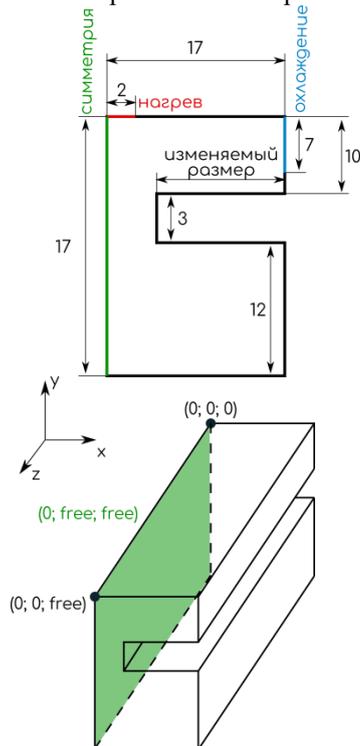


Рис. 1. Схема нагрева и охлаждения (слева) и закрепления (справа) исследуемого керамического зеркала

Тепловой поток подавался сверху зеркала, ширина облучаемой зоны была равна 2 мм, длина состав-

ляла 1/3 от общей длины зеркала. Плотность теплового потока задавалась в виде функции от координат. Материал зеркала – кремний. Коэффициент теплопроводности кремния задавался как функция от температуры, полученной после аппроксимации данных [1]. Моделирование проводилось без учёта радиатора, т.е. в месте соприкосновения зеркала с радиатором задавались условия вынужденной конвекции с коэффициентом теплоотдачи равным 3000 Вт и температурой 22 °С. На остальных границах задавались условия лучистого теплообмена с окружающей средой (вакуум, температура 22 °С, степень черноты зеркала принималась равной единице). Режим теплообмена считался стационарным.

Влияние глубины выреза на значение полных перемещений зеркальной поверхности представлены на рисунке 2. Значения перемещений исходной геометрии без выреза обозначены цифрой 1. Для изученной геометрии зеркала при увеличении глубины выреза, перемещения уменьшаются и при 12 мм достигают минимальных значений. Если глубина выреза превышает 12 мм, то перемещения начинают увеличиваться по сравнению с минимальным значением.

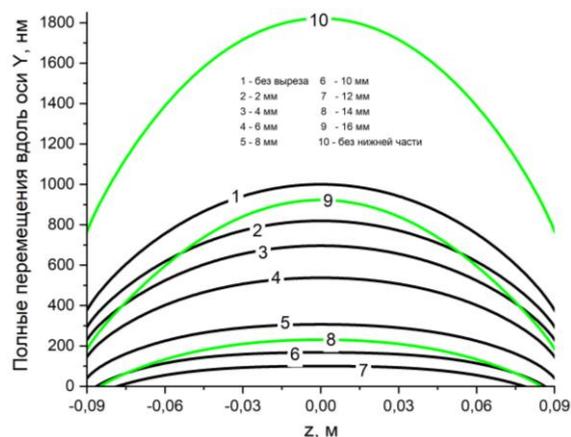


Рис. 2. Полные перемещения зеркальной поверхности по длине и ширине облучаемой зоны в зависимости от глубины выреза

## Список литературы:

1. Touloukian YS, Powell RW, Ho CY, Klemens PG. // Thermal Conductivity.-1970.- Boston, MA: Springer US

## ЦИКЛИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СТЕНАХ ЗДАНИЙ С ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Низовцев М.И., Стерлягов А.Н.

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

В разных технических приложениях возникают тепловые задачи, связанные, как с необходимостью аккумулирования и последующего выделения тепловой энергии, так и предотвращения перегрева различных элементов оборудования при пиковых нагрузках. Для решения подобных технических задач все шире используются фазоизменяемые материалы (ФИМы).

Активно начинают применяться ФИМы при строительстве и реконструкции зданий. Повышение термальной массы здания рассматривается, как одна из мер снижения энергозатрат на отопление, кондиционирование и повышение его энергоэффективности. Здания со стенами из лёгких теплоизоляционных материалов обычно подвержены резким колебаниям температуры воздуха в помещениях в сезоны отопления и кондиционирования из-за отсутствия достаточной тепловой инерции их ограждающих конструкций, что приводит к высокому потреблению энергии для обеспечения зоны комфортной температуры. Применение материалов с фазовым переходом рассматривается в качестве эффективного решения для контроля теплового состояния помещений.

Выполненный обзор работ по исследованию применения ФИМ в ограждающих конструкциях лёгких зданий показал, что фазоизменяемые материалы позволяют повысить теплоинерционность зданий и снизить затраты на отопление кондиционирование воздуха. Однако, несмотря на уже выполненные исследования, ряд вопросов требуют дополнительного изучения и рассмотрения. Так, получены в разных работах противоречивые данные по оптимальному месторасположению ФИМ в лёгких стеновых конструкциях, что связано с одной стороны, со многими факторами, которые оказывают влияние на оптимальное расположение ФИМ, а с другой стороны, большинство исследований проведено в реальных условиях при различном характере изменения наружных и внутренних параметров воздушной среды. Кроме того, не исследовано влияние ширины температурной зоны фазового перехода ФИМ и режимов изменения температуры наружного и внутреннего воздуха на эффективность применения ФИМ. На все эти вопросы обращено внимание при выполнении численных расчётных исследований в данной работе.

В докладе приведены результаты расчётного исследования эффективности применения ФИМ в конструкциях стен из лёгких теплоизоляционных материалов для снижения нагрева помещений в летний период. Использована энтальпийная модель расчёта теплообмена в многослойных материалах. В качестве одного из слоев рассмотрен слой макрокапсулированного ФИМ, который располагался в различных

зонах лёгкого теплоизоляционного материала. В качестве граничных условий с наружной стороны стены были выбраны суточные периодические колебания температуры воздуха относительно температуры  $25^{\circ}\text{C}$  с амплитудой  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $t_n = 25 + 10 \sin(2\pi t/\tau)$ , где  $t$  – текущее время, а  $\tau$  – суточный период. С внутренней стороны рассмотрены два разных граничных условия. Первое условие: кондиционирование помещения при постоянной температуре внутреннего воздуха  $21^{\circ}\text{C}$  и второе условие: периодические колебания температуры внутреннего воздуха синфазно с колебаниями наружного воздуха около температуры  $21^{\circ}\text{C}$  с амплитудой  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $t_n = 25 + 5 \sin(2\pi t/\tau)$ .

В результате расчётов определено влияние местоположения тонкого слоя ФИМ, в качестве которого использован парафин с различными температурами и шириной фазового перехода в легкой теплоизоляции из экструзионного пенополистирола толщиной 100 мм. На рис.1 в качестве примера показан один из интересных результатов работы, который при режиме синфазного изменения температуры внутреннего воздуха с наружным заключался в задержке почти на 12 часов между временем максимальной температуры воздуха на улице и максимальным значением теплового потока на внутренней поверхности стены при установке на ней слоя ФИМ толщиной 8% от общей толщины стены. Данный результат приводит в летний период к интенсивному охлаждению помещений в дневное время и, наоборот, к нагреву в ночное.

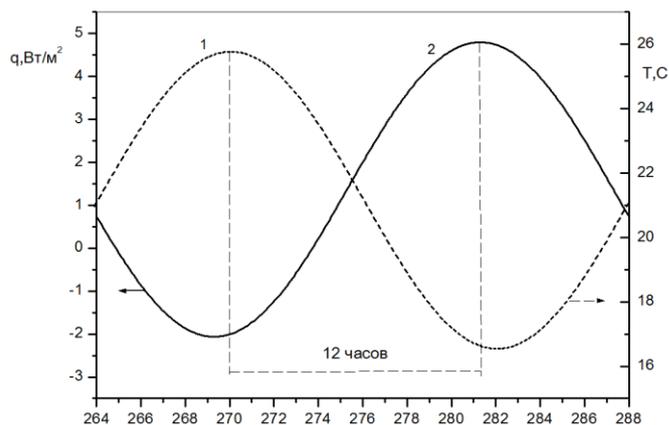


Рис. 1. Изменение: 1- температуры наружного воздуха, 2 - плотности теплового потока на внутренней поверхности стены.

Работа выполнена при поддержке мегагранта Министрства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-575).

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОПРИТОКОВ К ГЕОТЕРМАЛЬНЫМ ТЕПЛООБМЕННИКАМ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Половников В.Ю., Шелемехова С.Д.

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

Необходимость обеспечения надёжного теплового контакта между геотермальным теплообменником и окружающей его горячей породой приводит к использованию разнообразных засыпок. В качестве засыпок используются различные материалы, в том числе и увлажнённый песок.

При этом одним из наиболее вероятных факторов, который может привести к негативным следствиям при эксплуатации геотермальных теплообменников, является наличие фазовых переходов и процессов переноса массы в конструкциях и зонах их размещения.

Целью данной работы является оценка снижения теплопритоков к геотермальным теплообменникам.

При постановке задачи рассматривалась типичная конструкция теплообменника (рис. 1), используемого при эксплуатации геотермальных систем различного назначения. Рассматриваемая система состояла из трубопровода и обсадной цементной колонны. В полости 2 (между трубопроводом и обсадной колонной) находится засыпка из увлажненного песка [2].

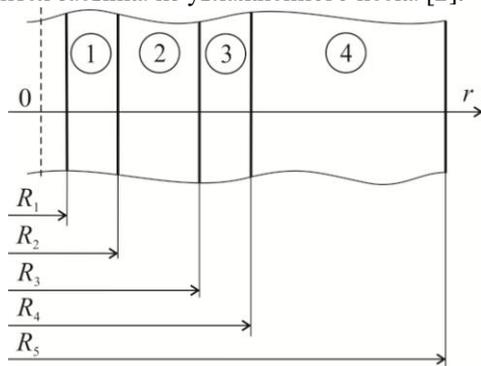


Рис. 1. Схема области решения: 1 – трубопровод; 2 – засыпка; 3 – обсадная колонна; 4 – разогретые породы

Предполагается, что до начала работы скважного теплообменника вода, содержащаяся в засыпке, при контакте с разогретыми элементами рассматриваемой системы, переходит в парообразное состояние. Низкотемпературный энергоноситель охлаждает рассматриваемую систему (рис. 1), а пар, находящийся в засыпке, конденсируется на «холодном» трубопроводе. Предполагается, что на протяжении всего периода эксплуатации реализуется вышеописанный процесс конденсации. Следствием конденсации пара является увеличение температуры стенки трубы и снижение теплопритоков к энергоносителю.

Анализ снижения теплопритоков сводится к решению нестационарной нелинейной задачи теплопроводности для области решения, показанной на рис. 1, с учётом конденсации пара на поверхности «стенка трубы – засыпка».

Исследования выполнены для 20 лет непрерывной работы геотермального теплообменника. Геометрические параметры рассматриваемой системы:  $R_1=0,05$  м;  $R_2=0,055$  м;  $R_3=0,1$  м;  $R_4=0,15$  м;  $R_5=50$  м

соответствовали типичной конструкции геотермального теплообменника (рис. 1).

Начальная температура, в рассматриваемой области решения, принималась равной температуре разогретых пород  $T_{ex}$  (298,15 – 373,15 К). Температура прокачиваемого энергоносителя составляла 278,15 К

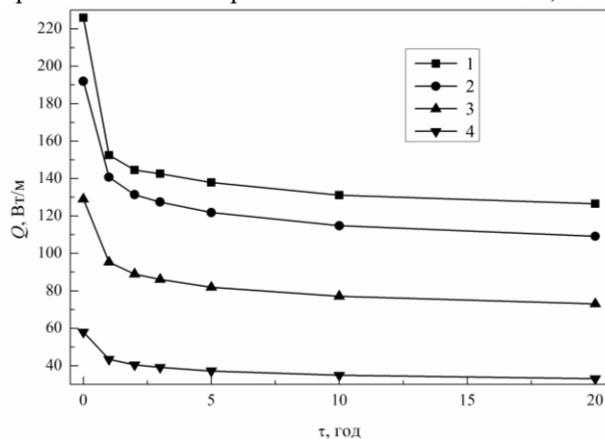


Рис. 2. Изменение теплопритоков к геотермальному теплообменнику: 1 –  $T_{ex} = 373,15$  К; 2 –  $T_{ex} = 348,15$  К; 3 –  $T_{ex} = 323,15$  К; 4 –  $T_{ex} = 298,15$  К.

Адекватность результатов моделирования следует из их сопоставления с данными о работе приповерхностных геотермальных установок [2].

Результаты численного моделирования (рис. 2), свидетельствуют о том, что приток тепла к геотермальному теплообменнику с увеличением времени работы ожидаемо уменьшается. Связано это со снижением градиента температур в окружающей разогретой породе.

В зависимости от длительности эксплуатации и температуры разогретой породы конденсация пара приводит к снижению теплопритоков на 4,55–31,19 %.

Из-за роста температуры стенки трубы (рис. 1) эффект от конденсации пара в конструкции геотермального теплообменника с течением времени уменьшается. Резкое снижение теплопритоков в начальный период времени объясняется сравнительно быстрым охлаждением внутренних слоев рассматриваемой системы из-за взаимодействия с прокачиваемым энергоносителем.

### Список литературы

1. Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 4. С. 113–122.
2. Богуславский Э.И. Освоение тепловой энергии недр. СПб.: Научно-технические технологии, 2020. 435 с.

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-29-00464).

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СИБИРИ

Половников В.Ю., Любимый Е.В.

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

Томская область заинтересована в развитии альтернативных генерирующих объектов, которые повысят надежность и доступность теплоснабжения. Известно, что в поселке Белый Яр Верхнекетского района Томской области еще в 1961 году пробурена артезианская скважина глубиной в 2,5 км. Температура геотермального источника составляет более 70 градусов [1].

Целью работы является численный анализ тепловых режимов месторождений геотермальных источников энергии в Томской области.

Рассматривается один из наиболее типичных в РФ видов двухколонной геотермальной скважины: колонны, кондуктор и направления которой выполнены из цемента. На рис 1 приведено схематичное изображение рассматриваемого объекта.

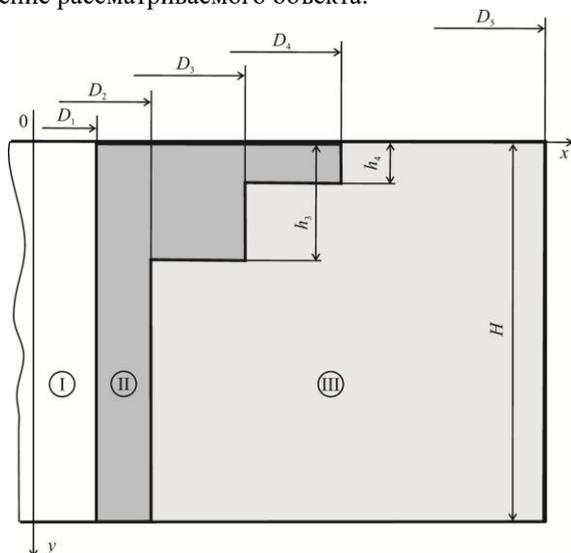


Рис. 1. Схема области решения: I – энергоноситель; II – колонны, кондуктор и направления; III – порода

В упрощённом виде анализ тепловых режимов геотермальных месторождений сводится к решению нестационарной двумерной задачи теплопроводности с соответствующими краевыми условиями.

На границе  $D_1$  выставлялись граничные условия первого рода, а на границе  $D_5$  – второго. На поверхностях контакта между слоями вводились условия идеального теплового контакта. На поверхности  $y = 0$  осуществляется конвективный теплообмен, а при  $y = H$  считалось, что тепловой поток равен нулю.

Сформулированная задача решена методом конечных разностей, при следующих исходных данных:  $D_1=168$  мм;  $D_2=299$  мм;  $D_3=473$  мм,  $D_4=630$  мм,  $D_5=50$  м,  $h_3=650$  м,  $h_4=10$  м,  $H=2500$  м. Значение температуры в начальный момент времени принималось равным 272,7 К. Температура наружной среды составляла 273,15 К, а коэффициент теплоотдачи – 20 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Температура энергоносителя внутри трубы составляла 343.15 К.

Типичные результаты численного моделирования приведены на рис. 2 и 3.

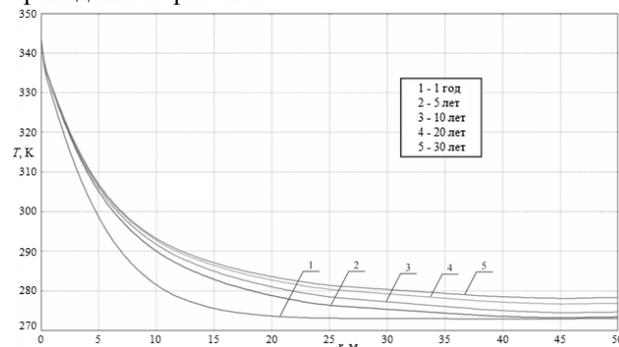


Рис. 2. Распределение температур в рассматриваемой области решения на глубине 5 м.

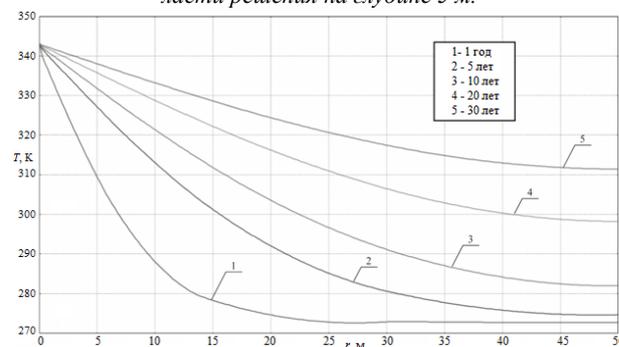


Рис. 3. Распределение температур в рассматриваемой области решения на глубине 2500 м.

Характер распределений температур (рис. 2, 3) позволяет говорить об ожидаемой их зависимости от глубины рассматриваемого сечения. Рис. 2 и 3, свидетельствуют о существенном влиянии нестационарности процессов теплопереноса на распределение температур. Анализ полей температур показывает, что со временем они выравниваются, однако за рассматриваемый промежуток времени (30 лет) стационарный режим теплопроводности еще не наступает.

Влияние теплоотвода на верхней границе оказывает влияние на тепловые режимы месторождений геотермальных источников энергии в Томской области до глубины в 50-70 метров (сопоставление рис. 2 и 3). Этот результат важен в практическом плане, поскольку позволяет выбирать варианты бурения скважин (вертикальное, горизонтальное или наклонное) и расстояния между ними.

### Список литературы

1. Официальный интернет-портал Администрации Томской области. 2023. URL: <https://tomsk.gov.ru/news/front/view/id/102710> (дата обращения: 12.05.2023).

Работа поддержана РФФ  
(грант № 23-29-00464).

Сажин И.А., Шеремет О.В.

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

Анизотропные материалы широко применяются в элементах авиационных конструкций, ослабленных технологическими каналами. Выполнение условий прочности при минимизации веса является необходимым условием в процессе проектирования и изготовления конкретного изделия. Температура каналов, в которых рабочая жидкость имеет высокое давление, существенно отличается от температуры элемента конструкции. Обеспечение условия равнопрочности, т.е. выравнивания тангенциальных напряжений на границе отверстия, позволяет выполнить условие прочности при минимизации весовых параметров конструкции в целом. Поле температур влияет на распределение деформаций и тепловых напряжений в окрестности ослабления. В данной работе рассмотрен случай двумерной ортотропии. Для решения обратной задачи теории упругости анизотропного массива, имеющего вырез, форма которого подлежит определению, сформированы комплексные потенциалы С.Г. Лехницкого  $\Phi'_j(\sigma_j)$ . Граничные условия записываются в следующем виде:

$$\sigma_n + \sigma_\tau = 2\operatorname{Re}\left(\sum_{j=1}^2 (1 - \beta_j^2) \Phi'_j(\sigma_j)\right)$$

$$\sigma_\tau - \sigma_n + \tau_{nc} = 2\operatorname{Re}\left(\sum_{j=1}^2 (1 + \beta_j)^2 \Phi'_j(\sigma_j)\right)$$

Комплексные константы  $\beta_j$ , граничные точки  $\sigma_j$  определены в соответствии с [1]. Осуществлено конформное отображение внешности единичного круга в плоскости  $Z$  на внешность эллипсов в плоскостях  $Z_1, Z_2$ :  $z_j = \omega(\zeta_j)$ . На контуре отверстия задано давление  $p$ .

Тангенциальное напряжение  $\sigma^*$  на контуре ослабления постоянно и подлежит определению. Искомые потенциалы С.Г. Лехницкого и конформное отображение разыскиваются в виде степенных рядов. Параметры анизотропии среды определяют форму отверстия. Например, для параметров анизотропии  $\beta_1 = 1.90, \beta_2 = 0.53$  полуоси эллипса относятся как 1:0.57.

Уравнение стационарной теплопроводности ортотропного массива записано в цилиндрической системе координат [2]. Заданы температуры на границе отверстия и на бесконечности. Реализована конечно-разностная процедура в соответствии с [3]. Для ортотропного массива с нагретым каналом получено поле температур, имеющее две оси симметрии. Особенность поверхности температур как двумерной функции координат заключается в существенном отличии градиента температуры вдоль осей ортотропии массива. Ниже представлен один из вариантов расчёта. Выбраны значения коэффициентов теплопроводности направлений ОХ, ОУ относящихся между собой как 2:1. Температуры равны  $95^\circ\text{C}$  и  $20^\circ\text{C}$  на границе канала и на бесконечности, соответственно.

Изменение величин температур вдоль оси ОХ на расстоянии не более 10 больших полуосей эллипса равнопрочного канала можно представить следующим рядом:

$$95-88-83-78-74-70-66-62-59-55-51 .$$

Вдоль оси ОУ:

$$95-76-64-55-50-45-41-38-36-34-30.$$

Вдоль луча ( $\pi/4$ ):

$$95-83-74-67-57-50-47-44-42-39-35.$$

Градиенты температур вдоль главных осей тепловой ортотропии в окрестности границ канала отличаются более, чем в 2.5 раза. На практике это означает наличие неравномерного поля температурных напряжений и деформаций. Представляется целесообразным применить усиливающий конструкцию элемент в форме равнопрочного цилиндра, расположенного вокруг канала. Следуя методике [1], имеется возможность определения формы такого подкрепления, которое обеспечит сохранение весовых характеристик конструкции в целом.

#### Список литературы

1. Напряженное состояние анизотропных сред с отверстиями или полостями /А.С. Космодамианский, «Вища школа»,1976, 200с.
2. Теплопроводность твердых тел /Г. Карслоу, Д.Эгерт М.,«Наука»,1964, 487с.
3. Численные методы. А.А.Самарский, А.В. Гулин. М. «Наука», Гл. ред.физ-мат. лит., 1989, 432с.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ С ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫМИ РАБОЧИМИ ТЕЛАМИ

Елистратов С.Л., Сеськин И.Н.

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

Переход к использованию в тепловых насосах (ТН) рабочих тел природного происхождения сейчас является общемировой тенденцией и отвечает международным требованиям энергетической, экологической и экономической эффективности.

В ближайшее время будут доминировать природные рабочие вещества (хладагенты): аммиак, углеводороды, диоксид углерода, вода, воздух. Повысился интерес к новым экологически безопасным и энергетически эффективным принципам получения тепла и холода.

Углекислый газ R744 (CO<sub>2</sub>) определил один из основных трендов будущего развития ТН благодаря экологической безопасности и физическим свойствам: низкому потенциал глобального потепления (GWP = 1); отсутствию влияния на озоновый слой (ODP=0); экологической безопасности (в малых концентрациях в воздухе нетоксичен, участвует в природных процессах фотосинтеза, производя кислород); полному отсутствию горючести (используется в качестве средства пожаротушения); высокой удельной холодо- и теплопроизводительности.

Значительное изменение температуры газообразного R744 позволяет нагревать теплоноситель на большую разность температур с минимальными потерями энергии.

Основные трудности, связанные с применением в качестве хладагента, обусловлены его низкой критической температурой 31,05°C и высокими рабочими давлениями при реализации прямого и обратного термодинамических циклов.

В цикле теплового насоса высокая энергетическая эффективность, более высокая, чем у фреоновых (углеводородных) ТН, может быть обеспечена при соответствующем выборе параметров нагреваемой среды и оптимизации других параметров цикла.

Аммиак (NH<sub>3</sub>, R717) – как хладагент – отличное рабочее вещество, с отличными термодинамическими свойствами благодаря высокой удельной теплоте парообразования.

Тепловые насосы, работающие на аммиаке, достигают более высокой эффективности использования энергии, чем системы R407C и R134a при тех же рабочих условиях. Для теоретического однофазового цикла теплового насоса, работающего при температуре испарения/конденсации -5°C/50°C, при изэнтропическом/адиабатическом сжатии и без перегрева или переохлаждения при всасывании, издержки производства на цикл аммиака составляют на 7% и 11% больше, чем в циклах R134a и R407C. Разница будет больше в реальных системах в результате благоприятных термодинамических свойств аммиака. Это включает более высокую температуру кривой насыщения, превосходные свойства теплообмена и высокую эффективность компрессора.

По термодинамическим свойствам аммиак — один из лучших хладагентов, по объёмной холодопроизводительности он значительно превышает R12, R11, R22 и R502, имеет более высокий коэффициент теплоотдачи, что позволяет применять в теплообменных аппаратах трубы меньшего диаметра. Аммиак имеет чрезвычайно высокое значение теплоты парообразования, вследствие чего сравнительно мал массовый расход циркулирующего хладагента (13-15 % по сравнению с R22).

Изобутан R600a C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> является природным газом. Он безопасен для окружающей среды, не вредит озоновому слою и не создает парниковый эффект. Благодаря тому, что он работает при относительно невысоком давлении, системы, заправленные им более тихие при работе. Изобутан широко применяется как в бытовых холодильных установках, так и в кондиционерах и рефрижераторах на автомобилях. Для заправки контура его нужно сравнительно немного, так как он обладает высокой удельной массой.

Перспективным практическим преимуществом изобутана (R-600a) является возможность его использования в стандартных парокомпрессионных тепловых насосах для нагрева теплоносителя системы отопления выше 100 °С. Изобутан благодаря замечательным термодинамическим и кинетическим характеристикам, как и другие углеводороды прекрасно подходит для использования в качестве хладагентов. За счёт своих свойств он способен обеспечить малую разницу давлений и сравнимую, а то и более высокую эффективность системы по сравнению с синтетическими альтернативами.

### Список литературы

1. Дж. Стин, 1998: МЭА Приложение 22: Заключительный Отчет – Инструкции по проектированию и эксплуатации систем компрессионных тепловых насосов, кондиционирования воздуха и охлаждения, работающих на природных рабочих жидкостях. МЭА ПТН Отчет №. HPP-AN22-4. ISBN 90-73741-31-9.
2. Ян Боне, Тадаси Хамаока, Николай Овсянников, Вадим Дмитриев. Утилизация тепла конденсации холодильной установки с помощью аммиачного теплового насоса. MAYEKAWA MFG. CO., LTD. Токио, Япония. Холодильный бизнес №7 июль 2015г.
3. Ливьо де Сантоли, Джанлуиджи Ло Бассо, Давиде Астиасо Гарсия. Динамическая имитационная модель применения транскритического двуокисного теплового насоса для повышения низкотемпературных распределительных сетей в жилых помещениях. Римский университет Сапиенца, Via Eudossiana, 2019г.
4. Джакомо Тосато, Паоло Артузо. Экспериментальное и численное исследование транскритического реверсивного теплового насоса CO<sub>2</sub> воздух/вода: анализ производства горячей воды в домашних условиях. Институт строительных технологий, Corso Stati Uniti 4 – 35127 Падуа (Италия), 2020г.
5. CoolPack, 2000. Программа моделирования для тепловых насосов и холодильных установок, разработанная в Техническом Университете Дании (свободно распространяемое ПО). <http://www.et.web.mek.dtu.dk/Coolpack/UK/>

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОБНОГО ПУСКА КОНДЕНСАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕННИКА НА ВОДОГРЕЙНОМ КОТЛОАГРЕГАТЕ С ЦИКЛОННО-ВИХРЕВЫМИ ПРЕДТОПКАМИ

Штым К.А.<sup>1</sup>, Кулагина Т.А.<sup>2</sup>, Соловьёва Т.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет,  
п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, 690922, Россия

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

Водогрейный котельный агрегат типа КВГМ-100-150, установленный на Владивостокской ТЭЦ-1, модернизирован на циклонно-вихревую технологию (ЦВТ) сжигания жидкого и газообразного топлива. Сжигание жидкого топлива осуществляется в циклонно-вихревом предтопке (ЦВП) за счёт распыла топлива через многосопловую центробежную форсунку [1, 2, 3]. Подвод газообразного топлива на сжигание осуществляется через систему газовых сопел, обеспечивающую комбинированный ввод газа в камеру сгорания (КС) ЦВП. Система циркуляции воды в котле модернизирована с целью повышения коэффициента теплопередачи. На нагрузках ниже 70 % от номинальной в конвективной части котла наблюдался режим конденсации водяных паров уходящих газов. Рабочий КПД брутто котла относительно низшей теплоты сгорания топлива при это составлял 94÷96 %, что выше нормативного значения равного 92,7 % при работе на природном газе.

Сжигание газообразного топлива как основного позволяет рассмотреть возможность установки конденсационного теплообменника (КТО) за котельным агрегатом с целью повышения эффективности и экологичности его работы во всем диапазоне нагрузок.

Значительное количество низкопотенциальной теплоты содержится именно в водяных парах продуктов сгорания природного газа. Использование скрытой теплоты, полученной в процессе конденсации водяных паров из дымовых газов, позволит увеличить мощность котла при том же количестве сжигаемого топлива. Это приведёт к сокращению выбросов парниковых газов за счёт снижения объёма и температуры уходящих дымовых газов и снижению затрат теплоисточника на собственные нужды.

Для исследования процессов теплообмена и определения эффективных режимов работы поверхностей теплообмена за водогрейным котлом ст. №5 Владивостокской ТЭЦ-1 установлен экспериментальный КТО состоящий из трёх теплообменных секций площадью  $F=10,8 \text{ м}^2$ . Особенность конструкции КТО заключается в том, что его поверхность нагрева состоит из трубок аналогичных трубкам конвективных поверхностей нагрева котла. Это даёт преимущества при проведении ремонтных работ. В связи с этим основная задача исследований заключается в определении оптимального коэффициента теплопередачи во всем диапазоне нагрузок работы котла.

Расчёт влажности сухого газа при нормальных условиях до и после КТО выполнен согласно ГОСТ 17.2.4.08-90 [4] по данным полученным конденсационным методом измерения влажности газов.

Результаты расчёта показали, что влажность сухого газа при нормальных условиях до КТО составляла  $66 \text{ г/м}^3$ , а после  $57 \text{ г/м}^3$ . В результате конденсации

влаги из дымовых газов осушение газов произошло на  $9 \text{ г/м}^3$ . Образовавшийся конденсат, в объёме  $\approx 100 \text{ л}$ , имеет значение рН равное 3,6. Для подавления образования термических оксидов азота конденсат целесообразно подавать в КС ЦВП. Снижение эмиссии оксидов азота достигается не только за счёт ступенчатости сгорания топлива в КС ЦВП, но и за счёт впрыска конденсата в область активного горения через многосопловую центробежную форсунку.

Расход дымовых газов, пропускаемых через КТО во время пробного пуска, составил  $1,34 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $4824 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), температура дымовых газов на входе в КТО составляла  $104 \text{ °C}$  и  $63 \text{ °C}$  на выходе. Максимальный расход дымовых газов, который пропускается через КТО, равен  $2,79 \text{ м}^3/\text{с}$  из которых  $0,52 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $\leq 18,6 \%$ ) направляется по обводной линии для контроля влажности дымовых газов перед дымовой трубой.

Охлаждение дымовых газов на  $41 \text{ °C}$  осуществлялось подводом  $690 \text{ л/ч}$  воды с температурой  $9 \text{ °C}$ . Подогрев воды до  $50 \text{ °C}$ , с последующим направлением в сборный бак охладителей проб, позволяет снизить затраты на подогрев воды перед ионообменными фильтрами. В ходе пробного пуска тепловая мощность экспериментального КТО составила  $0,028 \text{ Гкал/ч}$ , коэффициент теплопередачи  $25,56 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ .

Результаты планируемых исследований дадут информацию для разработки полномасштабной промышленной конденсационной установки.

Котлоагрегат КВГМ-100-150 ст. №5 Владивостокской ТЭЦ-1 является котлом на котором реализуется комплекс энергосберегающих мероприятий. Комплексное повышение эффективности работы позволит получить максимально возможный термический КПД, наиболее эффективные технико-экономические и экологические показатели с оптимальным для энергетики сроком окупаемости.

### Список литературы

1. Штым А. Н., Штым К.А., Соловьёва Т.А. Опыт эксплуатации на Дальнем Востоке котлоагрегатов оснащенных циклонно-вихревыми предтопками // Материалы VIII международного симпозиума «Горение и плазмохимия» и научно-технической конференции «Энергоэффективность-2015». 2015г. – Алматы: Казак университі, 2015. 541 с. – с. 512 - 516. ISBN 978-601-04-1388-7
2. Shtym K.A., Dorogov E.Iu., Goncharenko Y.B., Upsky M.V. Experience of multinozzle swirl-type injectors study and application, JP Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 18 (2), 301–314.
3. Shtym K.A., Solov'eva T.A. Conversion of KVGM-100-150 boiler to cyclone-swirl burning of gas // Thermal Engineering. - 2015. - Vol. 62, - No.3. - P. 202-207.
4. ГОСТ 17.2.4.08.-90 Охрана природы. Атмосфера. Методы определения влажности газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZNS-2022-0010).*

**УСКОРЕННОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ МИКРОЛИНЗ НА ТОРЦЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН МЕТОДОМ ЖИДКОСТНОГО ТРАВЛЕНИЯ, ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ****Шмырова А.И., Нурмухаметов Д.И., Корнилицын А.Р., Пономарёв Р.С., Паньков А.С.**Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
ул. Букирева 15, Пермь, 614068, Россия

В работе экспериментально продемонстрировано влияние конвективных потоков ускоряющих изготовление микролинз на торце оптических волокон методом жидкостного травления. Показано, что нисходящий поток фторида кремния, формирующийся в объёме плавиковой кислоты, может быть инвертирован встречным восходящим потоком, который удаётся возбудить с помощью инфракрасного излучения, пропускаемого через обрабатываемое волокно. Наличие гидродинамических потоков приводит к выносу продуктов реакции и притоку свежих реагентов, что приводит к интенсификации всего процесса в целом. Вариация мощности источника позволяет управлять структурой результирующих течений и влиять на конечную форму получаемых микролинз.

**Введение**

Фотонные интегральные схемы, являющиеся оптическим аналогом микроэлектронных схем, дополняют современную электронику, обеспечивая обработку и передачу по оптическому волокну огромных объемов данных. Современные чипы фотонных интегральных схем на основе кремния или InP обладают высокой плотностью расположения элементов, что требует применения волноводов с малым диаметром ввода порядка 1 мкм и с высоким контрастом. Использование волоконных световодов с микролинзами на торце, называемые также линзованными оптическими волокнами, позволяет решить данную технологическую задачу. Одним из наиболее распространенных методов производства таких волокон является метод травления. На сегодняшний день известны метод объёмного травления [1], травление в капле [2, 3], двухэтапное капельное травление [4], травление в защитно-упрочняющем покрытии [5]. Процесс травления протекает в объёме плавиковой кислоты на границе раздела с несмешивающимся с ней верхним реагентом или газовой фазой.

**Методика эксперимента**

В данной работе процесс химического травления осуществлялся в ячейке Хеле-Шоу, заполненной на 2/3 объёма 40% раствором плавиковой кислоты и 1/3 органического растворителя ксилола, олеиновой кислоты или вакуумного масла VM-1С на 1) торце прямоосколотого волокна, зачищенного от акрилатного покрытия и буфера на 1 см; 2) зачищенного только от буферного покрытия и сколотого до уровня защитно-упрочняющего покрытия; 3) и 4) аналогично первым двум случаям, но под влиянием гидродинамического течения, которое генерируется инфракрасным излучением, проходящим через обрабатываемое волокно. Течение визуализировалось путем добавления в жидкую фазу полиамидных частиц нейтральной плавуче-

сти размером 20 мкм и углеродных частиц размером порядка 5 мкм. Съёмка течения осуществлялась с помощью скоростной видеокамеры в рассеянном свете. Для формирования вокруг волокна гидродинамического течения, волокно подключалось к лазерному диоду с  $\lambda=980$  нм, мощность которого варьировалась с помощью драйвера в пределах 65-195 мВт. Изменение мощности излучения позволяло управлять скоростью движения жидкости в кислотной среде.

**Результаты и их обсуждение**

В работе показано, что в отсутствие излучения вблизи волокна формируется гравитационная конвекция, интенсивность которой определялась разностью плотностей реагентов и продуктов травления. Пропускание инфракрасного излучения через оптическое волокно позволяет подавить опускное течение формирующимся подъёмным потоком за счёт действия диэлектростатических и термогравитационных сил. В зависимости от мощности излучения в работе реализовывались такие структуры как: пара конвективных валов, множество валов со «слепой» зоной в точке фокуса, а также мощные подъёмные потоки, растекающиеся под межфазной поверхностью. Последнее реализуется при условии, когда торец волокна расположен непосредственно на границе раздела или выше неё. Эксперименты показали, что под действием света процесс травления интенсифицируется. За одинаковое время воздействия размер линзованной части отличается более чем в два раза. Продемонстрировано, что травление волокна в защитно-упрочняющем покрытии независимо от наличия омывающего течения обеспечивает получение линзы более правильной формы с гладкой поверхностью по сравнению с травлением волокна, зачищенного от буфера и защитно-упрочняющего покрытия.

**Список литературы**

1. Gangopadhyay T. K. et al. Fabrication of tapered single mode fiber by chemical etching and used as a chemical sensor based on evanescent field absorption // Photonics 2010: Tenth International Conference on Fiber Optics and Photonics. SPIE. 2011. V. 8173. P. 500-509.
2. Zhang E. J., Sacher W. D., Poon J. K. S. Hydrofluoric acid flow etching of low-loss subwavelength-diameter biconical fiber tapers // Optics express. 2010. V. 18. №. 21. P. 22593-22598.
3. Arndt-Staufenbiel N. et al. Novel etching process based on molten salts for optical fiber components // Optical Interconnects XXII. SPIE, 2022. V. 12007. P. 84-95.
4. Chenari Z. et al. Adiabatic tapered optical fiber fabrication in two step etching // Optics & Laser Technology. 2016. V. 76. P. 91-95.
5. Stöckle R. et al. High-quality near-field optical probes by tube etching // Applied physics letters. 1999. V. 75. №. 2. P. 160-162.

*Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121101300016-2).*

**СО<sub>2</sub>-ЦИКЛЫ КАК РЕШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ  
НА ОРГАНИЧЕСКОМ ТОПЛИВЕ****Щинников П.А.**Новосибирский государственный технический университет  
пр. К. Маркса 20, Новосибирск, 630073, Россия

e-mail: shchinnikov@corp.nstu.ru

Экологические проблемы энергетики связывают в первую очередь с загрязнением окружающей среды через выбросы при сжигании органического топлива, доля которого превышает 60% в мировом энергобалансе. Любые сценарии развития, связанные с энергопереходом к генерации нового типа, сохраняют долю органического топлива в мировом энергобалансе свыше 50-ти процентов. Фактор использования органического топлива при генерации электро-, а для ряда территорий и теплоэнергии, ставит задачу поиска новых технических решений, по меньшей мере щадящих окружающую среду, а в лучшем случае, не оказывающих на неё никакого воздействия. Поиском подобных технических решений занимаются ведущие научные школы мира. Наиболее важным направлением считают сокращение антропогенного углеродного следа от действия традиционных энергетических циклов на органическом топливе. На этом пути рассматриваются разные варианты решений – от утилизации технологических «хвостов», содержащих загрязняющие вещества, до отказа от углеродсодержащего топлива с переходом на водородную энергетику.

Одним из вариантов решения экологической проблемы использования органического топлива при генерации энергии является переход на новое рабочее тело в виде углекислоты. Выделяют четыре типа термодинамических цикла на основе углекислоты.

Все они находятся в зоне сверхкритического углерода и отличаются способом повышения давления рабочего тела. Один из вариантов предложен Р. Алламом, носит его имя и получил практическую реализацию в опытно-экспериментальной установке мощностью 50 МВт. Каждый из вариантов СО<sub>2</sub>-циклов не оказывает воздействия на окружающую среду через выбросы углекислоты и, в этой связи, является циклом с «нулевыми» выбросами. Вместе с тем остаются открытыми вопросы технической реализации, энергетической эффективности, стоимости.

В докладе предлагаются результаты исследования СО<sub>2</sub>-циклов по термодинамическим, энергетическим и технико-экономическим параметрам и показателям эффективности СО<sub>2</sub>-циклов. Показаны термодинамическая эффективность СО<sub>2</sub>-циклов разной конфигурации и их энергетическая эффективность. Проведено сравнение по основным показателям с традиционными способами генерации энергии на органическом топливе. Проведены оценки стоимости СО<sub>2</sub>-циклов. Стоимость циклов разной архитектуры проведена поагрегатно, что позволяет обеспечить сравнительный анализ СО<sub>2</sub>-циклов как между собой, так и с другими известными способами генерации энергии.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского  
научного фонда №23-29-00035,  
<https://rscf.ru/project/23-29-00035/>*

## Содержание

<b>Пленарные лекции</b> .....	3
<b>Алхасов А.Б., Алхасова Д.А.</b> Технологии освоения геотермальных ресурсов северокавказского региона .....	5
<b>Игуменов И.К., Лукашов В.В.</b> Теплофизические аспекты формирования покрытий в процессах химического осаждения из газовой фазы .....	6
<b>Исаев С.А.</b> Аномальная интенсификация отрывного ламинарного течения и теплообмена на пластине и стенке узкого канала в приложении к микроэлектронике и воздушным конденсаторам. состояние и перспективы .....	7
<b>Кузнецов В.В.</b> Последние достижения в области двухфазного охлаждения теплонапряжённого оборудования ..	8
<b>Мильман О.О.</b> Проблемы и перспективы систем сухого охлаждения на тепловых электростанциях .....	9
<b>Михеев Н.И., Давлетшин И.А., Душин Н.С.</b> Неравновесность процессов и стабилизация режимов течения в государственных первичных эталонах расхода текучих сред .....	10
<b>Ненарокомов А.В., Будник С.А., Титов Д.М., Ревизников Д.Л., Неверова Д.А., Моржухина А.В.</b> Определение параметров газового потока по измерению теплового потока, поглощенного элементом конструкции .....	11
<b>Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А.</b> Структура двухфазной среды жидкий металл и газовая фаза .....	12
<b>Рудяк В.Я.</b> Электропроводность наножидкостей .....	13
<b>Секция 1. Теплообмен и гидродинамика в однофазных средах</b> .....	15
<b>Васнёв И.Р., Гольдфельд М.А., Федорова Н.Н.</b> Моделирование чувствительного элемента датчиков тепловых потоков в нестационарных высокоскоростных течениях .....	17
<b>Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Шакиров Р.Р.</b> Теплоотдача в отрывных пульсирующих потоках .....	18
<b>Дектерев А.А., Кузнецов В.А., Мальцев Л.И., Алексеенко С.В., Дектерев Ар.А., Тэпфер Е.С.</b> Математическое моделирование новых технологий факельного сжигания угля с использованием воды и водяного пара .....	19
<b>Евграфова А.В., Ветров А.Л., Щапов В.А.</b> Влияние геометрии города на распределение температуры поверхности.....	20
<b>Карра Ж.-Б., Гаврилов Н.В., Черданцев А.В., Шмакова Н.Д., Ерманиук Е.В.</b> Влияние угла раствора и скорости падения на захват воздуха при соударении конуса с жидкостью .....	21
<b>Куйбин П.А.</b> Развитие аналитических моделей для описания закрученных течений .....	22
<b>Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Курдюмов А.С., Светоносков А.И., Чинак А.В.</b> Экспериментальное исследование естественной циркуляции в контуре с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем .....	23
<b>Локтионов В.Д., Мухтаров Э.С.</b> Модифицированные соотношения для чисел Нуссельта при неравномерном радиальном распределении температуры в плоском слое металлического расплава, подогреваемого снизу .....	24
<b>Макаров М.С.</b> О влиянии масштабирования по мощности на эффективность энергоразделения газовой смеси с малым числом Прандтля в одиночной трубе Леонтьева .....	25
<b>Наумов И.В., Скрипкин С.Г., Тинтулова М.В., Шарифуллин Б.Р.</b> Экспериментальное исследование формирования вихревой структуры в газовихревом биореакторе с плавающей шайбой .....	26
<b>Астапов А.Н., Жестков Б.Е., Погодин В.А., Ртищева А.С.</b> Расчётно-экспериментальное исследование теплообмена образца высокотемпературной керамики в потоке плазмы .....	27
<b>Ряжских А.В., Краснов А.А., Ряжских В.И.</b> Повышение компактности противоточного пластинчатого теплообменника за счёт использования наножидкостей в качестве теплоносителей .....	28
<b>Сахнов А.Ю., Брызгалов К.В., Наумкин В.С., Лебеда К.С.</b> Влияние величины теплового потока на течение в сужающемся канале .....	29
<b>Сорокин М.И., Федотов И.А.</b> Экспериментальное исследование влияния геометрии сопла на вихревые структуры в ближней области свободной струи .....	30
<b>Стрекалов З.З., Есин С.Б., Сухоруков Ю.Г., Егоров П.В., Миронова М.В., Михайлов В.В., Арсеньев С.А.</b> Исследование сепарационной модели сепаратора-пароперегревателя .....	31
<b>Строева П.С., Ничик М.Ю., Дулин В.М.</b> Анализ динамики импактной затопленной струи в условиях внешнего двухмодового возмущения .....	32
<b>Хазов Д.Е., Виноградов Ю.А.</b> Теплообмен и трение при турбулентном обтекании обратной ступеньки сверхзвуковым потоком .....	33
<b>Черевко А.А., Бугай Ю.В.</b> Особенности течения крови вблизи сосудистых патологий головного мозга.....	34
<b>Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В., Тинтулова М.В.</b> Экспериментальное исследование влияния граничных условий на структуру вихревого течения жидкости в цилиндре с вращающимся диском .....	35
<b>Ширяева М.А., Субботин С.В.</b> Эволюция режимов течений генерируемых инерционными волнами во вращающемся цилиндре с неосесимметричными торцами .....	36
<b>Шмакова Н.Д., Рудая Я.Е., Ерманиук Е.В.</b> Исследование интегральных характеристик аттракторов внутренних волн .....	37

**Секция 2. Гидродинамика и тепломассообмен в многофазных системах ..... 39**

**Апостол Ю.С., Вожаков И.С.** Численное моделирование волнового режима течения слоя жидкости, увлекаемого турбулентным газовым потоком ..... 41

**Валиуллина В.И., Аюпов А.Р., Галеев Р.Р., Мусин А.А., Ковалева Л.А.** Исследование динамики расслоения полидисперсной эмульсии в потоке при электромагнитном воздействии ..... 42

**Валова Г.С., Черевко А.А., Богомякова О.Б., Тулупов А.А., Акулов А.Е.** Математическое моделирование гемодинамики головного мозга на основе данных магнитной резонансной томографии ..... 43

**Гореликова А.Е., Кашинский О.Н., Чинак А.В.** Исследование движения отдельных пузырей в потоке жидкости в наклонной трубе ..... 44

**Чинак А.В., Гореликова А.Е.** Влияние объёмного расходного газосодержания на средний размер пузырей и расстояние между пузырями в газожидкостном течении в наклонном плоском канале ..... 45

**Дибиров Я.А., Зейналов М.Ш.** Результаты испытаний солнечного воздухонагревателя с фазопереходными тепловыми аккумуляторами ..... 46

**Диева Н.Н., Кравченко М.Н., Мардахасев Г.М., Пивоваров Д.Е.** Моделирование прогрева пласта воздействием азотгенерирующего состава ..... 47

**Евдокименко И.А., Лобанов П.Д., Блель В., Джентрик К., Си-Ахмед Э-К., Легран Д., Марэк Е.** Идентификация режимов пузырькового течения в прямоугольном канале с каскадом внезапных расширений ..... 48

**Егоров Р.И., Зайцев А.С.** Программируемое осаждение суспензии под действием конвективных течений при точечном нагреве ..... 49

**Зайцев А.С., Егоров Р.И.** Влияние модуляции мощности нагрева на картину конвективного течения при точечном лазерном нагреве ..... 50

**Скрипкин С.Г., Цой М.А., Кашкарова М.В., Кравцова А.Ю.** Влияние длины щелевого зазора на возникновение кавитации ..... 51

**Кукшинов Н.В., Дмитриева А.А., Морской Д.Н., Французов М.С.** Исследование статистических характеристик паровой фазы при кипении гидрофторэфира ..... 52

**Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Лаптева Е.А.** Совместный тепломассообмен с сепарацией аэрозолей в осевых и закрученных дисперсно-кольцевых потоках газа и жидкости ..... 53

**Лежнин С.И.** Простые модели для описания эволюции структуры двухфазного потока ..... 54

**Лукьянов Ан.А., Роньшин Ф.В., Воробьев М.А., Вожаков И.С.** Численное исследование локальных характеристик при снарядном потоке в микрочанале квадратного сечения ..... 55

**Марышев Б.С., Клименко Л.С.** Конвективная устойчивость фильтрационного течения через горизонтальный слой пористой среды с учётом закупорки и модуляции потока ..... 56

**Морской Д.Н., Кукшинов Н.В., Чирков А.Ю., Молчанов Т.И., Зубков Н.Н.** Экспериментальные исследования интенсификации теплообмена при кипении насыщенных жидкостей на поверхностях с микрорельефом ..... 57

**Абаимов Н.А., Никитин А.Д., Симбирятин Л.В., Рыжков А.Ф.** Разработка лабораторной установки газификации биомассы в фонтанирующем и поточном режимах с использованием физического и численного моделирования ..... 58

**Ершов М.И., Тупоногов В.Г., Никитин А.Д., Суворин И.Д., Рыжков А.Ф.** Исследование структурно-динамических характеристик в модели реактора конверсии древесного опила ..... 59

**Рамазанов М.М., Булгакова Н.С., Лобковский Л.И.** Теоретическое исследование процесса промерзания пород, насыщенных раствором соли, с учётом осмотического эффекта ..... 60

**Сахнов А.Ю., Володин О.А., Печёркин Н.И., Павленко А.Н.** Влияние угла смачивания и числа Рейнольдса на режимы стекания плёнки жидкости по вертикальному цилиндру ..... 61

**Серёдкин А.В., Гобызов О.А., Ягодницына А.А.** Разработка метода активного управления свойствами снарядного режима в микроканале на основе машинного обучения ..... 62

**Архипов В.А., Усанина А.С., Чуркин Р.А.** Влияние природы поверхностно-активного вещества на динамику всплытия одиночного пузырька и группы пузырьков в дистиллированной воде ..... 63

**Фазлетдинов С.У., Питюк Ю.А.** Численное исследование эффективности вытеснения нефти в сетях микроканалов ..... 64

**Вожаков И.С., Черданцев А.В.** Численное исследование высокоскоростных наклонных ударов капель по поверхности плёнки жидкости ..... 65

**Шарифуллина Т.С., Черевко А.А., Горбатов А.В., Панарин В.А.** Моделирование гемодинамики в окрестности артериовенозной мальформации в процессе нейрохирургической операции ..... 66

**Шебелева А.А., Минаков А.В.** О влиянии размера капли на период индукции разрушения её в потоке за ударной волной ..... 67

**Шмырова А.И., Шмыров А.В.** Экспериментальная проверка поверхностного числа Рэлея ..... 68

**Щербаков М.Е., Калайдин Е.Н.** Геометрические характеристики микро и нано капли в зависимости от толщины поверхностного слоя капли ..... 69

**Яворский Н.И.** Об определении минимального времени коалесценции движущихся пузырей ..... 70

<b>Секция 3. Фазовые переходы</b> .....	71
<b>Давыдов М.Н., Чернов А.А.</b> Вопросы нуклеации и роста ансамбля газовых пузырьков в газонасыщенном магматическом расплаве, подвергшемся быстрой декомпрессии .....	73
<b>Зорькина А.И., Роньшин Ф.В., Кабов О.А.</b> Экспериментальное исследование динамики роста парового пузыря в условиях микрогравитации .....	74
<b>Левин А.А., Хан П.В.</b> Влияние микроразмерных пузырьков пара на теплообмен при нестационарном кипении недогретой жидкости .....	75
<b>Орлова Е.Г., Слюсарский К.В., Дорожкин А.В.</b> Испарение капель жидкостей на текстурированных поверхностях металлов и керамических материалов .....	76
<b>Роньшин Ф.В., Зорькина А.И., Редников А., Тадрист Л., Кабов О.А.</b> RUBI: Эталонный эксперимент по исследованию роста одиночного парового пузыря в условиях микрогравитации .....	77
<b>Феоктистов Д.В., Лага Е.Ю., Лавриненко С.В.</b> Влияние полярной и дисперсной составляющих поверхностного натяжения на реализацию диспергирования бинарных жидкостей .....	78
<b>Хан П.В., Левин А.А.</b> Экспериментальное изучение нестационарного кипения в потоке недогретой жидкости с учётом взаимодействия пузырьков на поверхности нагревателя .....	79
<b>Чернов А.А., Давыдов М.Н.</b> Влияние бародиффузии на динамику роста газового пузырька в магматическом расплаве .....	80
<b>Эмиров Р.М., Гаджимагомедов С.Х., Алиханов Н.М.-Р., Рабаданов М.Х.</b> Синтез наночастиц магнетита трёхэлектродным электрохимическим методом .....	81
<b>Секция 4. Научные основы нефтегазовых технологий</b> .....	83
<b>Байкин А.Н.</b> Моделирование криволинейного распространения трещины автогрп в пороупругой среде .....	85
<b>Дмитрачков Д.К., Байкин А.Н.</b> Модель автоГРП с учётом эффекта пороупругости и упрощённой механикой трещины .....	86
<b>Жигарев В.А., Гузей Д.В., Лысакова Е.И., Минаков А.В.</b> Влияние добавки наноматериалов в буровой раствор на эффективность транспорта шлама из горизонтальной скважины .....	87
<b>Жигарев В.А., Гузей Д.В., Пряжников А.И., Скоробогатова А.Д., Минаков А.В.</b> Экспериментальное исследование довытеснения вязкой нефти наносuspensionями .....	88
<b>Имомназаров Б.Х., Байкин А.Н., Старовойтова Б.Н.</b> Обратная задача об определении компонентного состава углеводородной смеси газоконденсатного месторождения на основе прямого численного моделирования .....	89
<b>Кармушин С.Р.</b> Нестационарные течения вязкоупругой жидкости в модели Джонсона — Сигалмана с несколькими временами релаксации .....	90
<b>Кравченко М.Н., Лесина Н.В., Аминев Д.А.</b> Проявление аномального снижения проницаемости при высокотемпературном воздействии на карбонатный коллектор .....	91
<b>Минаков А.В., Гузей Д.В., Пряжников А.И., Якимов А.С., Жигарев В.А.</b> Использование микро- и нанофлюидных технологий в задачах нефтегазовой отрасли .....	92
<b>Пряжников А.И., Якимов А.С., Пряжников М.И., Минаков А.В.</b> Микрофлюидное исследование процесса вытеснения нефти из микрофлюидных чипов имитирующих пористую среду .....	93
<b>Солнышкина О.А.</b> Исследование однофазных течений и мобильности капель эмульсии в поросетевой модели .....	94
<b>Шебелева А.А., Минаков А.В., Пряжников М.И., Пряжников А.И., Шебелев А.В.</b> Влияние концентрации наночастиц на режимы двухфазного течения в микроканале Y-типа .....	95
<b>Секция 5. Гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы</b> .....	97
<b>Рашковский С.А., Кузнецов В.Т., Басалаев С.А., Костюшин К.В.</b> Пиролиз смесевых композиций на основе полиборида алюминия и связующего НТРВ при воздействии лучистой энергии .....	99
<b>Гореликов Е.Ю., Литвинов И.В., Шторк С.И.</b> Анализ скоростной видеосъёмки горения предварительно перемешанной смеси обеднённого топлива в вихревой горелке с помощью POD разложения .....	100
<b>Арефьев К.Ю., Гуськов О.В., Кукшинов Н.В., Мамышев Д.Л.</b> Применение интегральной зависимости выгорания водорода при его подаче в высокоскоростной спутный поток .....	101
<b>Серебряков Д.И.</b> Численное исследование интенсификации горения водорода при спутной подаче посредством генерации акустико-вихревых колебаний в инжекторе .....	102
<b>Сластная Д.А., Хребтов М.Ю., Мулладжанов Р.И., Дулин В.М.</b> Численное моделирование неустойчивого горения конусного пламени, направленного на плоскую охлажденную преграду .....	103
<b>Слюсарский К.В., Болур Э.</b> Характеристики зажигания и горения образцов твёрдого топлива с добавками пиролизной жидкости древесины различных пород .....	104
<b>Тен К.А., Прууэл Э.Р., Рубцов И.А., Кашкаров А.О., Халеменчук В.П., Студенников А.А., Шехтман Л.И., Пиманов П.А., Гармашев А.Ю., Смирнов Е.Б., Музыка А.К., Просвирнин К.М., Галиулин И.Г.</b> Восстановление плотности на фронте детонации ТАТБ .....	105

**Секция 6. Численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике..... 107**

**Бугай Ю.В., Черевко А.А.** Применение методов машинного обучения для оценки параметров кровотока ..... 109

**Жданов Р.К., Гец К.В., Божко Ю.Ю., Белослудов В.Р.** Исследование влияния ПАВ на кинетику образования гидратов при помощи методов молекулярной динамики ..... 110

**Дектерев Д.А., Литвинцев К.Ю., Мешкова В.Д., Дектерев Ар.А.** Анализ применимости численных моделей для моделирования ветровой комфортности микрорайонов ..... 111

**Долуденко А.Н., Денисенко В.В., Фортова С.В., Колоколов И.В., Лебедев В.В.** Численное моделирование эластической турбулентности в двумерной периодической ячейке ..... 112

**Елагин И.А., Карчевская А.С., Чирков В.А.** Моделирование электрокоалесценции разноимённо заряженных капель воды, взвешенных в слабопроводящей жидкости ..... 113

**Журавлев Д.В., Васильков С.А., Чирков В.А., Елагин И.А.** Особенности численного моделирования неоднородного нагрева литий-ионного аккумулятора ..... 114

**Платонов Д.В., Сентябов А.В., Минаков А.В., Шторк С.И., Скрипкин С.Г.** Численное исследование влияния дисперсности воздушной фазы на режим течения в закрученном потоке на примере модельной тангенциальной камеры ..... 115

**Остапенко В.В., Полунина Е.И., Хандеева Н.А.** Об интегральной сходимости схем сквозного счёта при расчёте газодинамических ударных волн ..... 116

**Ма Ц., Токарев М.П.** Создание эффективных численных моделей для описания турбулентного течения при низких числах Прандтля на основе методов машинного обучения ..... 117

**Бирюков М.И., Шалимов Ю.Н., Хвостов А.А.** Идентификация теплового режима наплавки клиновых пазов рамы тележки железнодорожного подвижного состава ..... 118

**Шепелев В.В., Чупров П.А., Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Фортова С.В.** Двухжидкостное гидродинамическое моделирование облучения мишени из фторида лития рентгеновским лазером ..... 119

**Секция 7. Методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента ..... 121**

**Головатюк А.С., Бердов Р.Д., Нефедова В.В.** Расчётно-экспериментальное определение термоэрозийной стойкости теплозащитных материалов при воспроизведении высотных условий в газодинамической трубе .. 123

**Деринг Е.Д., Дубровин К.А., Зарвин А.Е., Каляда В.В.** Рассеяние мономеров и малых кластеров молекулярного пучка аргона на фоновом газе ..... 124

**Зуев В.О., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Бакакин Г.В.** Автоматизация калибровки системы контроля геометрии объекта методом фазовой триангуляции в климатической аэродинамической трубе ..... 125

**Кабардин И.К., Меледин В.Г., Двойнишников С.В., Степанов К.И., Мухин Д.Г., Зуев В.О., Гордиенко М.Р., Какаулин С.В., Ледовский В.Е., Гольцев Н.С.** Развитие комплексного метода диагностики профиля поверхности обледенелого профиля лопасти и исследования его аэродинамики ..... 126

**Кирчанова Е.Е., Попов Я.Е., Токарев М.П., Дулин В.М.** 3D регистрация траекторий движения мелкомасштабного летательного аппарата ..... 127

**Нефедова В.В.** Экспериментальное исследование термохимической стойкости покрытия образцов из углерод-керамического композиционного материала в высокотемпературном воздушном потоке ..... 128

**Попов Я.Е., Кирчанова Е.Е., Дулин В.М.** Разработка программно-аппаратного комплекса для определения параметров струйных жидкостных инжекторов ..... 129

**Савицкий А.Г.** Измерение полей температуры и скорости в модельной камере сгорания с использованием оптических методов ..... 130

**Савицкий А. Г., Толстогузов Р.В.** Экспериментальное исследование влияния постоянного электрического поля на распределение температуры в пламени ..... 131

**Федотов И.А., Токарев М.П.** Скоростной светодиодный осветитель для оптических исследований ..... 132

**Секция 8. Теплофизические свойства веществ и новые материалы ..... 133**

**Абдулагатова З.З., Абдулагатов И.М., Григорьев Б.А., Бакмаев А.Г., Омаров З.М.** Теплопроводность, теплоёмкость и температуропроводность резервуарных пород, насыщенных тяжёлой нефтью, до и после высокотемпературной обработки ..... 135

**Асильбеков А.К., Слюсарский К.В., Ларионов К.Б.** Электродуговая газификация различных фракций пиролизного масла отработанных шин ..... 136

**Богатищева Н.С., Галкин Д.А.** Теплопроводность и температуропроводность растворов гваякол / глицерин и 2,6-лутидин / вода ..... 137

**Боярских К.А., Хищенко К.В.** Уравнение состояния жидкой фазы вольфрама с малым числом параметров ..... 138

**Гаджимагомедов С.Х., Рабаданов М.Х., Алиханов Н.М.-Р., Гаджиев М.Х., Эмиров Р.М., Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х., Рабаданова А.Э., Сайпулаев П.М., Фараджев Ш.П.** Градиентные материалы на основе феррита висмута ..... 139

**Гаджимагомедов С.Х., Палчаев Д.К., Рабаданов М.Х., Мурлиева Ж.Х., Эмиров Р.М., Алиханов Н.М.-Р., Хашава А., Рабаданова А.Э., Сайпулаев П.М., Фараджев Ш.П., Хибиева Л.Р., Шапиев Г.Ш.** Возможность изготовления сверхпроводящей пленки 3 - поколения ..... 140

<b>Кудияров В.Н., Эльман Р.Р., Курдюмов Н.Е., Пушилина Н.С.</b> Изучение теплофизических свойств системы накопления водорода на основе гидрида магния и каталитических добавок .....	141
<b>Лысакова Е.И., Пряжников М.И., Минаков А.В.</b> Совершенствование рецептуры буровых растворов с помощью добавок углеродных нанотрубок .....	142
<b>Лебезов А.А., Морозов А.В., Сахибгареев А.Р., Шленкин А.С.</b> Исследование свойств концентрированных растворов борной кислоты применительно к охлаждению реакторных установок ВВЭР .....	143
<b>Магомедов М.М.-Ш.</b> Теплопроводность многокомпонентных водно-солевых систем.....	144
<b>Пашук Е.Г., Рамазанова А.Е.</b> Барическая зависимость теплопроводности песчаников различной пористости.....	145
<b>Рамазанова А.Е., Абдулагатова З.З.</b> Процесс переноса тепла в среде с изменяющимися теплофизическими свойствами.....	146
<b>Сахапов С.З., Сорокин Д.В., Зайцев О.В.</b> Создание тонких плёнок титан-графен .....	147
<b>Середкин Н.Н., Хищенко К.В.</b> Уравнение состояния сплава титан—молибден в широком диапазоне давлений и температур.....	148
<b>Смовж Д.В., Сорокин Д.В., Комлина С.В., Бетке И.А.</b> Влияние графена на смачиваемость текстурированных поверхностей.....	149
<b>Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Устюжанин Е.Е., Очков В.Ф., Рыков В.А.</b> Некоторые термодинамические свойства $H_2O$ на бинадали в рамках теории ренормализационной группы .....	150
<b>Хищенко К.В.</b> Уравнения состояния тугоплавких металлов в задачах физической гидродинамики .....	151
<b>Шапиев Г.Ш., Палчаев Д.К., Алиханов Н.М.-Р., Мурлиева Ж.Х., Рабаданов М.Х., Каллаев С.Н., Омаров З.М., Бакмаев А.Г.</b> Теплофизические свойства нано- и микрокристаллической керамики феррита висмута. ....	152
<b>Секция 9. Электрофизические явления в газовых и жидких средах .....</b>	<b>153</b>
<b>Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Яландин М.И.</b> Убегание электронов в газовом промежутке с коническим катодом .....	155
<b>Зубарева О.В., Зубарев Н.М., Яландин М.И.</b> Условия убегания электронов в газовом диоде с клиновидным катодом .....	156
<b>Коробейников С.М., Бобровская С.С., Красильникова Е.А.</b> О возникновении частичных разрядов в пузырьках при переменном напряжении и действии рентгеновского излучения .....	157
<b>Кузнецов Г.В., Кравченко Е.В.</b> Оценка характерных температур базового элемента типичной электрохимической батареи при охлаждении в режиме естественной конвекции .....	158
<b>Куперштох А.Л., Медведев Д.А., Альянов А.В.</b> Теплоотдача с поверхности электрода при разрыве тонкой плёнки жидкости электрическим полем .....	159
<b>Луцек В.В., Чирков В.А.</b> Численное моделирование особенностей электрокоалесценции двух капель воды различающихся радиусов.....	160
<b>Ридель А.В., Бычков А.Л., Ломан В.А., Прокопенко Я.Г.</b> Поведение газового пузырька, расположенного на электроде в трансформаторном масле .....	161
<b>Карпов Д.И., Ридель А.В., Савенко Р.А.</b> Инициирование стримера в жидкости с поверхности пузырька после ЧР в нём.....	162
<b>Секция 10. Теплообмен и гидродинамика в технологических процессах.....</b>	<b>163</b>
<b>Васильев А.Ю.</b> Методы распыливания жидких топлив. Барботирование.....	165
<b>Горшков А.С., Ларионов К.Б., Губин В.Е.</b> Исследование процесса совместного пиролиза отходов .....	166
<b>Диденко Д.В., Никаноров О.Л., Рогожкин С.А.</b> Численное моделирование тепломассопереноса в шахте высокотемпературного газоохлаждаемого реактора.....	167
<b>Елистратов С.Л., Ануфриенко А.В.</b> Экологически чистое теплоснабжение малых городов и поселений с использованием тепловых насосов .....	168
<b>Елистратов С.Л., Хорева В.А., Чирцов Д.Ю.</b> Система тригенерации на базе цикла стирлинга и абсорбционного термотрансформатора.....	169
<b>Калтаев А.Ж., Ларионов К.Б., Губин В.Е.</b> Получение и исследование энергетически ценных продуктов из нефтешламных отходов методом парового пиролиза .....	170
<b>Борисов Б.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И., Нагорнова Т.А., Салагаев С.О., Салихов Ф.Ю.</b> Поля скоростей в локальной зоне влияния газового инфракрасного излучателя .....	171
<b>Лысакова Е.И., Жигарев В.А., Скоробогатова А.Д.</b> Разработка и исследование буровых растворов на основе технических растительных масел.....	172
<b>Мисюкова А.Д., Янковский С.А., Берикболов А.К.</b> Влияние доли древесной биомассы при термической переработке торфа на выход трёх полезных продуктов: жидкие углеводороды, синтез-газ, углерод .....	173
<b>Мухин Д.Г., Елистратов С.Л., Степанов К.И.</b> Перспективы применения абсорбционных бромистолитиевых тепловых насосов (АБТН) в теплоэнергетике и промышленности с утилизацией тепла геотермальных источников .....	174
<b>Наумкин В.С.</b> Моделирование термодформации керамических зеркал .....	175

<b>Низовцев М.И., Стерлягов А.Н.</b> Циклические тепловые процессы в стенах зданий с фазоизменяемыми материалами .....	176
<b>Половников В.Ю., Шелемехова С.Д.</b> Численный анализ снижения теплопритоков к геотермальным теплообменникам в условиях длительной эксплуатации.....	177
<b>Половников В.Ю., Любимый Е.В.</b> Численный анализ тепловых режимов геотермальных месторождений Сибири .....	178
<b>Сажин И.А., Шеремет О.В.</b> Поле температур нагретого равнопрочного канала в анизотропном массиве .....	179
<b>Елистратов С.Л., Сеськин И.Н.</b> Сравнительный анализ эффективности парокompрессионных тепловых насосов с экологически чистыми рабочими телами.....	180
<b>Штым К.А., Кулагина Т.А., Соловьёва Т.А.</b> Результаты пробного пуска конденсационного теплообменника на водогрейном котлоагрегате с циклонно-вихревыми предтопками .....	181
<b>Шмырова А.И., Нурмухаметов Д.И., Корнилицын А.Р., Пономарёв Р.С., Паньков А.С.</b> Ускоренное изготовление микролинз на торце оптических волокон методом жидкостного травления, интенсифицированного инфракрасным излучением.....	182
<b>Щинников П.А.</b> CO <sub>2</sub> -циклы как решение экологической проблемы энергетики на органическом топливе ....	183

## Авторский указатель

- Абаимов Н.А., 58  
Абдулагатов И.М., 135  
Абдулагатова З.З., 135, 146  
Акулов А.Е., 43  
Алексеев С.В., 19  
Алиханов Н.М.-Р., 81, 139, 140, 152  
Алхасов А.Б., 5  
Алхасова Д.А., 5  
Альянов А.В., 159  
Аминев Д.А., 91  
Ануфриенко А.В., 168  
Апостол Ю.С., 41  
Арефьев К.Ю., 101  
Арсеньев С.А., 31  
Архипов В.А., 63  
Асильбеков А.К., 136  
Астапов А.Н., 27  
Аюпов А.Р., 42  
Байкин А.Н., 85, 86, 89  
Бакакин Г.В., 125  
Бакмаев А.Г., 135, 152  
Басалаев С.А., 99  
Белослудов В.Р., 110  
Бердов Р.Д., 123  
Берикболов А.К., 173  
Бетке И.А., 149  
Бирюков М.И., 118  
Блель В., 48  
Бобровская С.С., 157  
Богатищева Н.С., 137  
Богоякова О.Б., 43  
Божко Ю.Ю., 110  
Болур Э., 104  
Борисов Б.В., 171  
Боярских К.А., 138  
Брызгалов К.В., 29  
Бугай Ю.В., 34, 109  
Будник С.А., 11  
Булгакова Н.С., 60  
Бычков А.Л., 161  
Валиуллина В.И., 42  
Валова Г.С., 43  
Васильев А.Ю., 165  
Васильков С.А., 114  
Васнёв И.Р., 17  
Ветров А.Л., 20  
Виноградов Ю.А., 33  
Вожяков И.С., 41, 55, 65  
Володин О.А., 61  
Воробьев М.А., 55  
Гаврилов Н.В., 21  
Гаджиев М.Х., 139  
Гаджимагомедов С.Х., 81, 139, 140  
Галеев Р.Р., 42  
Галиулин И.Г., 105  
Галкин Д.А., 137  
Гармашев А.Ю., 105  
Гец К.В., 110  
Гобызов О.А., 62  
Головатюк А.С., 123  
Гольдфельд М.А., 17  
Гольцев Н.С., 126  
Горбатов А.В., 66  
Гордиенко М.Р., 126  
Гореликов Е.Ю., 100  
Гореликова А.Е., 44, 45  
Горшков А.С., 166  
Григорьев Б.А., 135  
Губин В.Е., 166, 170  
Гузей Д.В., 87, 88, 92  
Гуськов О.В., 101  
Давлетшин И.А., 10, 18  
Давыдов М.Н., 73, 80  
Двойнишников С.В., 125, 126  
Дектерев А.А., 19  
Дектерев Ар.А., 19, 111  
Дектерев Д.А., 111  
Денисенко В.В., 112  
Деринг Е.Д., 124  
Джентрик К., 48  
Дибиров Я.А., 46  
Диденко Д.В., 167  
Диева Н.Н., 47  
Дмитрачков Д.К., 86  
Дмитриева А.А., 52  
Долуденко А.Н., 112  
Дорожкин А.В., 76  
Дубровин К.А., 124  
Дулин В.М., 32, 103, 127, 129  
Душин Н.С., 10  
Евграфова А.В., 20  
Евдокименко И.А., 48  
Егоров П.В., 31  
Егоров Р.И., 49, 50  
Елагин И.А., 113, 114  
Елистратов С.Л., 168, 169, 174, 180  
Ерманюк Е.В., 21, 37  
Ершов М.И., 59  
Есин С.Б., 31  
Жаховский В.В., 119  
Жданов Р.К., 110  
Жестков Б.Е., 27  
Жигарев В.А., 87, 88, 92, 172  
Журавлев Д.В., 114  
Зайцев А.С., 49, 50  
Зайцев О.В., 147  
Зарвин А.Е., 124  
Зейналов М.Ш., 46  
Зорькина А.И., 74, 77  
Зубарев Н.М., 155, 156  
Зубарева О.В., 155, 156  
Зубков Н.Н., 57  
Зуев В.О., 125, 126  
Игуменов И.К., 6  
Имомназаров Б.Х., 89  
Иногамов Н.А., 119  
Исаев С.А., 7  
Кабардин И.К., 125, 126  
Кабов О.А., 74, 77  
Какаулин С.В., 126  
Калайдин Е.Н., 69  
Каллаев С.Н., 152  
Калтаев А.Ж., 170  
Каляда В.В., 124  
Кармушин С.Р., 90  
Карпов Д.И., 162  
Карра Ж.-Б., 21  
Карчевская А.С., 113  
Кашинский О.Н., 44  
Кашкаров А.О., 105  
Кашкарова М.В., 51  
Кирчанова Е.Е., 127, 129  
Клименко Л.С., 56  
Ковалева Л.А., 42  
Колоколов И.В., 112  
Комлина С.В., 149  
Корнилицын А.Р., 182  
Коробейников С.М., 157  
Костюшин К.В., 99  
Кравцова А.Ю., 51  
Кравченко Е.В., 158  
Кравченко М.Н., 47, 91  
Красильникова Е.А., 157  
Краснов А.А., 28  
Кудияров В.Н., 141  
Кудрявцева И.В., 150  
Кузнецов В.А., 19  
Кузнецов В.В., 8  
Кузнецов В.Т., 99  
Кузнецов Г.В., 158, 171  
Куйбин П.А., 22  
Кукшинов Н.В., 52, 57, 101  
Кулагина Т.А., 181  
Куперштох А.Л., 159  
Курдюмов А.С., 23  
Курдюмов Н.Е., 141  
Лавриненко С.В., 78  
Лага Е.Ю., 78  
Лаптев А.Г., 53  
Лаптева Е.А., 53  
Ларионов К.Б., 136, 166, 170  
Лебеда К.С., 29  
Лебедев В.В., 112  
Лебезов А.А., 143  
Левин А.А., 75, 79  
Легран Д., 48  
Ледовский В.Е., 126  
Лежнин С.И., 54  
Лесина Н.В., 91  
Литвинов И.В., 100  
Литвинцев К.Ю., 111  
Лобанов П.Д., 12, 23, 48  
Лобковский Л.И., 60  
Локтионов В.Д., 24  
Ломан В.А., 161  
Лукашов В.В., 6  
Лукьянов Ан.А., 55  
Луцек В.В., 160  
Лысакова Е.И., 87, 142, 172  
Любивый Е.В., 178  
Ма Ц., 117  
Магомедов М.М.-Ш., 144  
Макаров М.С., 25  
Максимов В.И., 171  
Мальцев Л.И., 19  
Мамышев Д.Л., 101

- Мардахаев Г.М., 47  
 Марышев Б.С., 56  
 Марэк Е., 48  
 Медведев Д.А., 159  
 Меледин В.Г., 126  
 Мешкова В.Д., 111  
 Мильман О.О., 9  
 Минаков А.В., 67, 87, 88, 92, 93, 95, 115, 142  
 Миронова М.В., 31  
 Мисюкова А.Д., 173  
 Михайлов В.В., 31  
 Михеев Н.И., 10, 18  
 Молчанов Т.И., 57  
 Моржухина А.В., 11  
 Морозов А.В., 143  
 Морской Д.Н., 52, 57  
 Музыря А.К., 105  
 Муляджанов Р.И., 103  
 Мурлиева Ж.Х., 139, 140, 152  
 Мусин А.А., 42  
 Мухин Д.Г., 126, 174  
 Мухтаров Э.С., 24  
 Нагорнова Т.А., 171  
 Наумкин В.С., 29, 175  
 Наумов И.В., 26, 35  
 Неверова Д.А., 11  
 Ненарокомов А.В., 11  
 Нефедова В.В., 123, 128  
 Низовцев М.И., 176  
 Никаноров О.Л., 167  
 Никитин А.Д., 58, 59  
 Ничик М.Ю., 32  
 Нурмухаметов Д.И., 182  
 Омаров З.М., 135, 152  
 Орлова Е.Г., 76  
 Остапенко В.В., 116  
 Очков В.Ф., 150  
 Павленко А.Н., 61  
 Палчаев Д.К., 139, 140, 152  
 Панарин В.А., 66  
 Паньков А.С., 182  
 Пашук Е.Г., 145  
 Печёркин Н.И., 61  
 Пивоваров Д.Е., 47  
 Пиманов П.А., 105  
 Питюк Ю.А., 64  
 Платонов Д.В., 115  
 Погодин В.А., 27  
 Половников В.Ю., 177, 178  
 Полунина Е.И., 116  
 Пономарёв Р.С., 182  
 Попов Я.Е., 127, 129  
 Прибатурин Н.А., 12, 23  
 Прокопенко Я.Г., 161  
 Просвирнин К.М., 105  
 Прууэл Э.Р., 105  
 Пряжников А.И., 88, 92, 93, 95  
 Пряжников М.И., 93, 95, 142  
 Пушилина Н.С., 141  
 Рабаданов М.Х., 81, 139, 140, 152  
 Рабаданова А.Э., 139, 140  
 Рамазанов М.М., 60  
 Рамазанова А.Е., 145, 146  
 Рашковский С.А., 99  
 Ревизников Д.Л., 11  
 Редников А., 77  
 Ридель А.В., 161, 162  
 Рогожкин С.А., 167  
 Роньшин Ф.В., 55, 74, 77  
 Ртищева А.С., 27  
 Рубцов И.А., 105  
 Рудая Я.Е., 37  
 Рудяк В.Я., 13  
 Рыжков А.Ф., 58, 59  
 Рыков В.А., 150  
 Рыков С.В., 150  
 Ряжских А.В., 28  
 Ряжских В.И., 28  
 Савенко Р.А., 162  
 Савицкий А.Г., 130, 131  
 Сажин И.А., 179  
 Сайпулаев П.М., 139, 140  
 Салагаев С.О., 171  
 Салихов Ф.Ю., 171  
 Сахапов С.З., 147  
 Сахипгареев А.Р., 143  
 Сахнов А.Ю., 29, 61  
 Светоносков А.И., 23  
 Сентябов А.В., 115  
 Серебряков Д.И., 102  
 Серёдкин А.В., 62  
 Серёдкин Н.Н., 148  
 Сеськин И.Н., 180  
 Си-Ахмед Э-К., 48  
 Симбирятин Л.В., 58  
 Скоробогатова А.Д., 88, 172  
 Скрипкин С.Г., 26, 51, 115  
 Сладкая Д.А., 103  
 Слосарский К.В., 76, 104, 136  
 Смирнов Е.Б., 105  
 Смовж Д.В., 149  
 Солнышкина О.А., 94  
 Соловьёва Т.А., 181  
 Сорокин Д.В., 147, 149  
 Сорокин М.И., 30  
 Старовойтова Б.Н., 89  
 Степанов К.И., 126, 174  
 Стерлягов А.Н., 176  
 Стрекалов З.З., 31  
 Строева П.С., 32  
 Студенников А.А., 105  
 Субботин С.В., 36  
 Суворин И.Д., 59  
 Сухоруков Ю.Г., 31  
 Тадрист Л., 77  
 Тен К.А., 105  
 Тинтулова М.В., 26, 35  
 Титов Д.М., 11  
 Токарев М.П., 117, 127, 132  
 Толстогузов Р.В., 131  
 Тулупов А.А., 43  
 Тупоногов В.Г., 59  
 Тэпфер Е.С., 19  
 Усанина А.С., 63  
 Устюжанин Е.Е., 150  
 Фазлетдинов С.У., 64  
 Фараджев Ш.П., 139, 140  
 Фарахов М.И., 53  
 Федорова Н.Н., 17  
 Федотов И.А., 30, 132  
 Феокистов Д.В., 78  
 Фортова С.В., 112, 119  
 Французов М.С., 52  
 Хазов Д.Е., 33  
 Халеменчук В.П., 105  
 Хан П.В., 75, 79  
 Хандеева Н.А., 116  
 Хашава А., 140  
 Хвостов А.А., 118  
 Хибиева Л.Р., 140  
 Хищенко К.В., 138, 148, 151  
 Хорева В.А., 169  
 Хребтов М.Ю., 103  
 Цой М.А., 51  
 Черданцев А.В., 21, 65  
 Черевко А.А., 34, 43, 66, 109  
 Чернов А.А., 73, 80  
 Чинак А.В., 23, 44, 45  
 Чирков А.Ю., 57  
 Чирков В.А., 113, 114, 160  
 Чирцов Д.Ю., 169  
 Чупров П.А., 119  
 Чуркин Р.А., 63  
 Шакиров Р.Р., 18  
 Шалимов Ю.Н., 118  
 Шапиев Г.Ш., 140, 152  
 Шарифуллин Б.Р., 26, 35  
 Шарифуллина Т.С., 66  
 Шебелев А.В., 95  
 Шебелева А.А., 67, 95  
 Шелемехова С.Д., 177  
 Шепелев В.В., 119  
 Шеремет О.В., 179  
 Шехтман Л.И., 105  
 Ширяева М.А., 36  
 Шлепкин А.С., 143  
 Шмакова Н.Д., 21, 37  
 Шмыров А.В., 68  
 Шмырова А.И., 68, 182  
 Шторк С.И., 100, 115  
 Штым К.А., 181  
 Шапов В.А., 20  
 Щербак М.Е., 69  
 Щинников П.А., 183  
 Эльман Р.Р., 141  
 Эмиров Р.М., 81, 139, 140  
 Яворский Н.И., 70  
 Ягодницына А.А., 62  
 Якимов А.С., 92, 93  
 Яландин М.И., 155, 156  
 Янковский С.А., 173

Ответственный за выпуск  
*к.ф.-м.н. Макаров М.С.*

Вёрстка  
*к.ф.-м.н. Наумкин В.С.*

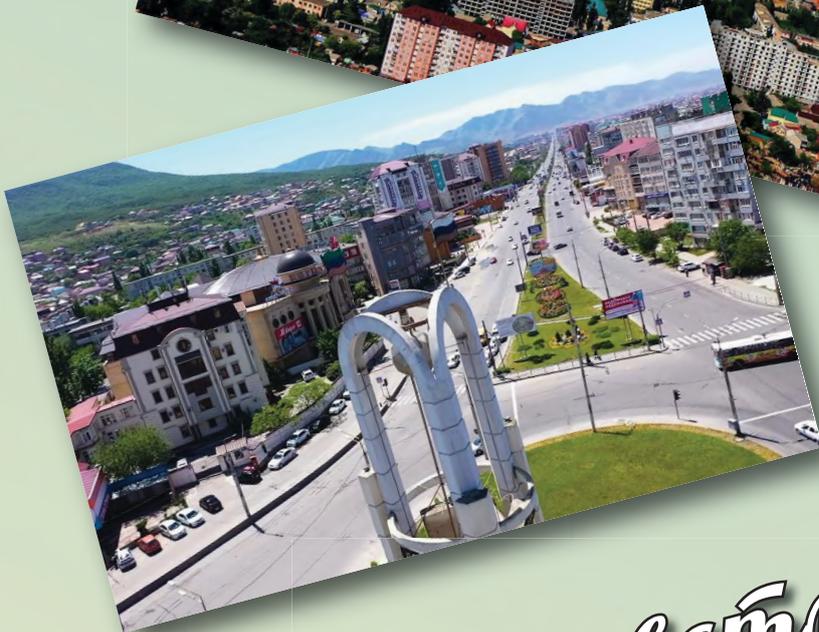
Обложка  
*Мартынец А.В.*

Подписано в печать 29.08.2023. Печать офсетная.  
Бумага офсетная пл. 80 гр. Формат 210×297 мм, 196 л.  
Тираж 160 экз. Заказ № 930.

---

Отпечатано в типографии  
ООО «Дигит Про»  
г. Новосибирск, ул. Журина 78 оф. 208





*Жидём встречи  
с Вами!*

